



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

**CdS / CdTe 이종접합
계층구조에 관한 연구**

**Analysis of Hierarchical CdS / CdTe
Nanowire Heterostructure**

2012년 8월

서 울 대 학 교 대 학 원

재 료 공 학 부

김 근 수

초 록

CdS와 CdTe는 상용화된 CdTe 태양전지를 구성하는 물질로서 약 30%에 이르는 이론적 효율에 비해 실제 효율은 약 17%에 머무르고 있다. 이러한 이론적 효율과 실제 효율의 차이점의 원인 중 하나로 박막형태로 제작되는 태양전지의 구조적 한계를 꼽는다.

Hierarchical Structure를 형성하였을 경우 박막 태양전지와는 다르게 태양광의 흡수 방향과 소수캐리어의 수집 방향을 수직으로 형성할 수 있기 때문에 태양전지 효율 향상을 기대할 수 있다.

Hierarchical Structure는 성장하는 System에 따라 형태와 특성이 다르게 나타나며, 특히, CdS / CdTe Nanowire Heterostructure에 대한 성장과 특성에 대한 연구보고가 많지 않다. 따라서 연구보고에 기본적인 특성 측정이 수반되어야 한다.

샘플은 CdS는 Au 촉매를 사용하여, CdTe는 Au와 Bi를 촉매로 사용하여 VLS 메커니즘을 통해 진공분위기인 Tubular Furnace 내에서 성장하였다. SEM을 이용하여 나무 형태를 이루고 기둥과 가지가 특정한 각도를 가지고 자라있음을 확인하였으며, XRD를 통하여 각 물질의 결정구조가 모두 Hexagonal임을 확인하였다.

기둥의 성장 방향은 $[0002]$, $[11\bar{2}0]$ 두 가지가 확인되었으며, $[0002]$ 성장시 가지는 $[11\bar{2}0]$ 으로, $[11\bar{2}0]$ 성장시 가지는 $[\bar{1}2\bar{1}3]$ 방향으로 성장하였다. TEM으로 $[0002]$ 성장은 명확한 Core-shell 구조가 $[11\bar{2}0]$ 성장에서는 Core가 한 쪽으로 치우친 형상을 EDS와 Moire Fringe를 통하여 확인하였다. 기둥과 가지의 EELS에서의 Peak의 차이점은 12eV에 해당하는 Interband Transition Peak Excitation이 기둥에서 더 명확하게 확인되고, 이는 기둥을 형성하는 CdS와 CdTe간의 Interaction에 의하여 Peak의 Intensity가

향상된 것이라 판단하였다.

저온 PL을 이용하여 광학적 특성을 확인하였다. 각 물질의 Energy Band Gap에 해당하는 peak인 2.42eV(CdS), 1.44eV(CdTe) 뿐 아니라, Intersitital로 작용하여 Donor State를 형성할 때 발생하는 2.05eV Peak이 더욱 Dominant함을 확인하여 Yellow emittion에 대한 특성을 확인하였다.

본 연구를 통해 CdS와 CdTe의 새로운 이종접합구조 성장을 확인하였으며, 다양한 분석방법을 통하여 신구조의 결정구조 및 관계, 광학적 특성, 전자 구조차이 등을 확인하였다. 이를 통하여 3차원 빌딩 구조 형성에 대한 가능성을 확인함으로서 태양전지 또는 나노소자 적용과 효율 향상을 위한 연구에 도움이 될 것으로 기대한다.

주요어 : Hierarchical Structure, CdS / CdTe, TEM

학 번 : 2010-23178

이 름 : 김 근 수

목 차

초 록	i
목 차	iii
List of Figures	v
List of Tables	vii
1.서 론	1
2.문헌연구	3
2.1 Hierarchical 나노구조 및 응용.....	3
2.1.1 Hierarchical 나노구조.....	3
2.1.2 나노와이어 성장(VLS mechanism)	6
2.1.3 Hierarchical Nanostructure 의 기등과 가지의 관계(Epitaxial Relationship).....	8
2.1.4 Hierarchical Nanostructure 의 응용.....	10
2.2 CdTe, CdS 의 물성 및 접합	12
2.2.1 CdTe 의 물성	12
2.2.2 CdS 의 물성 및 나노와이어 성장	14
2.2.3 CdTe / CdS 접합 및 태양전지 응용의 한계	17
2.2.4 CdS / CdTe 나노구조의 응용.....	21
3.실험방법	23
3.1 시편의 성장	23
3.2 SEM, XRD, PL, CL 의 측정	25
3.3 TEM 측정	27

3.3.1 TEM sample 제작.....	27
3.3.2 TEM 기본 관찰.....	27
3.3.3 EELS 관찰.....	29
4.실험결과	30
4.1 CdS / CdTe 기본 구조 및 성분 분석	30
4.1.1 Mophology 분석(SEM,TEM).....	30
4.1.2 XRD 결정구조 분석	34
4.1.3 회절패턴을 이용한 구조 분석	35
4.1.4 EDS 성분 분석	37
4.2 결정성장 방향에 따른 기둥과 가지의 관계	40
4.2.1 [1120] 결정성장 방향.....	41
4.2.2 [0002] 결정성장 방향.....	42
4.3 기둥과 가지의 EELS 분석	44
5.결 론	49
6.참고문헌	51
Abstract	53

List of Figures

Fig. 2-1 Scheme of (Left) Hierarchical structure & (Right) Hyperbranch Hierarchical Structure

Fig. 2-2 VLS Mechanism

Fig. 2-3 (Left) $\text{WO}_{3-\delta}$ Hierarchical Structure SEM, TEM Image and Diffraction Pattern of B-D, (Right) InAs SEM Image and Scheme of Growth Mechanism.

Fig. 2-4 Hierarchical Structure Application (A and B) LED, 3D EL Intensity, SEM Image, EL Spectrum of $p\text{-Si}/n\text{-GaAs}$. (C and D) Logic Circuit, NOR Logic Gate based on two sequential $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Ge}$, (E and F) Biosensor, Si/Au FET

Fig. 2-5 Theoretical Efficiency for given Bandgap using AM 0 and 1.5 Illumination

Fig. 2-6 (Left) [0002] CdS Nanowire Morphology (Right) Cross-section View

Fig. 2-7 Wurzite Hexagonal Structure and Zincblend Cubic Structure

Fig. 2-8 Energy Band Diagram after Junction Formation

Fig. 2-9 Simulation Data of Efficiency versus Solar Cell Thickness L and Minority Carrier Diffusion Length L_n for a Planar Cell and Radial Cell (Left) Si, (Right) GaAs

Fig. 2-10 CdS / CdTe Band Diagram, Schematic Diagram Fabrication Flow, SEM Image, J-V Measurement Data

Fig. 3-1 Color of CdS / CdTe Heterostructure Sample after First and Second Growth

Fig. 3-2 EDS signal of Hierarchical CdS / CdTe Hetero structure Select the Element EDS Window for Accuracy Analysis

Fig. 4-1 CdS / CdTe Hierarchical Structure Morphology Image. (Top) Close to the Source (Down) Far from the Source

Fig. 4-2 Various Hierarchical Nanowire Low Mag TEM Image with Directionality Branchs (Top) Growth Direction : $[11\bar{2}0]$ (Middle) Growth Direction : $[0002]$

Fig. 4-3 XRD Data of Hierarchical CdS / CdTe Hetero structure (H-CdS JCPDS : 41-1049, H-CdTe JCPDS : 19-0193)

Fig. 4-4 Diffraction Pattern & JEMS Simulation Data (Top) Zone Axis : $[2\bar{1}\bar{1}0]$ (Down) $[1\bar{1}00]$

Fig. 4-5 EDS Analysis and Scheme of CdS / CdTe Hierarchical Structure

Fig. 4-6 (Top) Moire Fringe Theoretical Image, (Down) Backbone HRTEM Image & FFT Analysis, (Inset) Double Diffraction Pattern Image (Arrow) Growth Direction

Fig. 4-7 High Magnification TEM Image & STEM Image (Top) Growth Direction : $[11\bar{2}0]$ (Bottom) Growth Direction : $[0002]$

Fig. 4-8 $[11\bar{2}0]$, $[0002]$ STEM, EDS Image & Scheme

Fig. 4-9 Backbone / Branch HRTEM Image & FFT Analysis (Top) $[11\bar{2}0]$ (Down) $[0002]$

Fig. 4-10 Growth Direction $[11\bar{2}0]$ (a) EELS Line Profile Region (b) EDS (C) EELS Data

Fig. 4-11 Growth Direction [0002] (a) EELS Line Profile Region (b) EDS (C) EELS Data

Fig. 4-12 (Top) CdS Reference PL Data (Down) CdS / CdTe PL Data

List of Tables

Table 2-1 Species of Homostructure and Heterostructure of Hierarchical Nanowires

Table 2-2 CdS Nanobelt Growth Direction and Their Surface Planes

Table 2-3 Basic Parameter Data of CdS and CdTe

1. 서론

대체에너지 중 하나인 태양에너지의 생산을 위한 태양전지는 기존 반도체 산업의 실리콘(Si)을 기반으로한 다양한 연구를 통해 고효율 태양전지가 개발되어 현재 약 23%의 에너지 효율을 얻는데 성공하여 실생활에 상용화되고 있다. 하지만, 산업 전반의 실리콘의 수요에 따른 국제적인 실리콘 웨이퍼의 가격상승과 제작 절차의 복잡성에 따라 가격 경쟁력 및 연구의 한계에 따른 추가적인 비용 절감의 한계로 인하여 실제 일반 가정의 보급화에 있어서의 한계가 존재한다.

이러한 경제적인 측면과 효율, 제작적인 측면의 한계를 극복하기 위하여 다양한 구조, 물질들이 연구되고 있다. 그 중, CdTe는 빛의 흡수에 가장 이상적인 에너지갭을 가지고(1.44eV) [1], 광 흡수율이 매우 높기 때문에 태양전지 제작에 주목을 받고 실제로 연구되고 있다.

이론적으로 계산된 CdTe 태양전지의 효율은 약 30%이지만 2012년 현재 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서 조사된 세계 기록은 약 17%를 기록하고 있다. 이러한 이론치와 실제치의 차이는 박막 형태의 태양전지의 한계는 소자의 제작 및 태양전지를 구성하는 재료의 선택에서도 나타나지만, 태양전지 제작에 있어서 박막형태의 구조적 한계 또한 존재한다.

태양전지의 고효율을 위해서는 첫째, 단결정 물질을 사용하여 다결정물질에서 존재하는 결함(Defect)를 줄여 생성된 캐리어의 재결합 확률을 줄여야 한다.

둘째, 빛은 최대한 흡수하면서 전하공핍층에서(Depletion Layer) EHP(Electron-hole Pair)도 많이 만들어야 하지만, 생성된 캐리어를 최대한 많이 수집될 수 있게하여야 한다. 하지만 박막형태로 소자를 제작하게 되었을 경우, 광이 흡수되는 경로와 생성된 전하가 분

리되는 p - n 접합 내의 전하 공핍층이 같은 방향으로 존재하기 때문에 빛의 흡수와 전하 분리를 위한 소자의 두께와 효율간의 Trade-off가 발생하게 된다.

이러한 박막형태의 한계는 단결정 성장이 용이한 1-D 나노 구조를 이용하여 해결하려는 연구들이 수행되고 있다. 이는 1-D 구조의 Aspect Ratio가 크기 때문에 캐리어의 생성이 용이하다는 점과 p - n 접합을 빛의 흡수되는 방향과 수직인 방향으로 형성함으로써 소수캐리어의 수명을 늘릴 수 있어 광흡수량과 수집 캐리어의 양을 늘려 효율을 늘릴 수 있기 때문이다. 이에 더 나아가 Tree-like한 Hierarchical 구조를 만들었는지 단순 Core-shell 구조에 의한 이중접합 구조보다 더 큰 Aspect Ratio가 생성이 가능하기에 Multi-junction의 효과 뿐 아니라 더 큰 Aspect Ratio를 가질 수 있기에 다양한 응용이 가능하다.

최근 CdS와 CdTe를 Au 촉매를 사용한 VLS 메커니즘을 통해 Hierarchical 구조의 성장이 가능해짐에 따라 이러한 구조의 응용을 위해서 필수적인 구조 분석과 특성 분석이 이루어져야 한다. 특히, CdS Backbone을 CSS 방법으로 성장시킬 때 Hexagonal 구조인 CdS의 결정 방향이 다양하게 존재하는데 이에 따른 구조의 Morphology의 특성이 변하게 된다. 우선적으로 이 신 구조에 대한 결정학적 분석을 진행하고, 각각 Backbone과 Branch 부분의 성분 분석을 EDS를 이용하여 분석하였으며, 결정 방향에 따른 각각의 기동과 가지에 대한 EELS 특성을 확인하였다.

이를 통하여 CdS / CdTe를 이용한 3-D 나노구조 태양전지의 형성에 대한 기초연구에 도움이 될 것으로 기대한다.

2. 문헌연구

2.1 Hierarchical 나노구조 및 응용

2.1.1 Hierarchical 나노구조

산업의 소형화 추세에 따른 신기술의 개발에 따라 기존 리소그래피(Lithography)로 대변되는 ‘Top-down’ 방식의 벌크(Bulk) 또는 마이크로미터(μm)의 세계에서 ‘Bottom-up’ 방식의 나노 스케일의 접근이 가능함에 따라 새로운 전기적 광학적 특성들이 발견되었다. 과학계에서는 이러한 현상에 대해 주목하여 현대는 가히 나노기술의 시대라 할 수 있을 만큼 다양한 재료와 소자에 대한 연구가 활발히 진행되고있다.

나노구조는 0차원인 양자점(Quantum Dot), 1차원인 나노와이어(Nanowire), 나노리본(Nanoribbon), 나노막대(Nanorod), 2차원인 박막(Thin Film) 등으로 구분되며, 이 중 나노와이어는 대표적인 1차원 구조로서 아래와 같이 3가지 장점을 가진다.

첫째, 넓은 범위에서의 Uniform한 조성과 구조를 가진 나노와이어 성장이 가능하다.

둘째, 장치에 응용을 위한 p -, n -type 도핑이 쉽게 가능하다.

셋째, 위의 두가지 장점을 이용한 다양한 물질의 이종접합 구조를 형성할 수 있다.

단순 이러한 장점을 가진 1차원 구조 뿐 아니라 3차원 빌딩 블록을 형성할 수 있는 가능성으로 다양한 구조의 나노와이어 또한 전기적 광학적 장치에 적용을 위해서 많은 연구가 이루어지고 있다.

나노와이어를 이용한 3차원 빌딩 블록이란 1차원의 구조를 다양한 방향으로 성장시켜 3차원의 입체구조를 만드는 것으로 각기 다른 축

과 방향을 가지는 나노와이어의 조성 또는 재료를 다르게 함으로서, 빌딩 블록에서 다양한 기능성을 구현할 수 있다.

Hierarchical 구조의 정의는 기둥(Backbone 또는 Trunk)을 이루고 있는 일차로 성장된 나노와이어에 실린더의 반지름 방향, 즉, 일차로 성장된 나노와이어 성장방향과 다른 방향으로 이차 나노와이어가 성장되어 가지(Branch)처럼 보이는 나무형상과 비슷한 구조를 말한다. (Fig. 2-1) 또한 가지에 또 3차로 또 다른 가지를 형성함에 따라 Hyperbranch 구조로도 성장시킬 수 있다.

최초의 이러한 Hierarchical 구조에 대한 연구는 2004년 스웨덴의 L. Samuelson 그룹과 미국의 M. Lieber 그룹에서 촉매를 사용한 VLS 메커니즘에 입각하여 GaP와 Si와 GaN에 대한 가지구조의 형성이 보고됨에 따라서 주목을 받았다. [2, 3] 이 논문 내에서 Hierarchical 구조를 성장시킴에 따라 직경과 길이, 가지의 밀도 등을 컨트롤 가능할 수 있음을 보임에 따라 이에 파생되는 연구들이 다양한 그룹에서 나노 소자에 대한 적용을 위해 다양한 그룹에서 연구를 진행하고 있다.

이런 가지를 이루는 나노와이어의 성장에 대한 메커니즘은 단순 VLS 메커니즘만 있는 것이 아니라 VLS 메커니즘과 Screw Dislocation의 복합 작용, Catalyst의 Chamber 내에서의 공급에 의한 Hyperbranch 생성, Solution Source를 이용한 방법 등 다양한 메커니즘이 존재하며 크게 이러한 구조는 $p-n$ 접합에서의 분류와 마찬가지로 기둥과 가지를 형성하는 물질의 동일 여부에 따라 2가지로 분류할 수 있다. 같은 물질로 이루고 있는 경우 Homostructure, 다른 물질로 이루고 있는 Heterostructure로 분류할 수 있다. (Table 2-1)

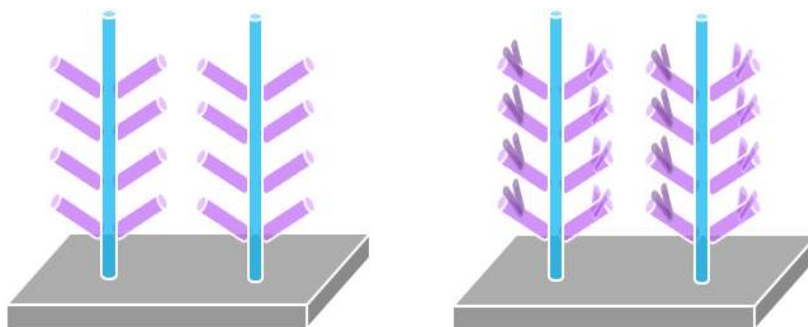


Fig. 2-1 Scheme of (Left) Hierarchical structure & (Right) Hyperbranch Hierarchical Structure

Hierarchical nanostructure		
	Homostructure	Heterostructure
Material	Si [2], GaN [2], ZnO[4] [5], WO ₃ [6], PbS[7], PbSe[8], ZnSe, CdS[9], TiO ₂ [10], InAs[11] [12], CdTe[13]	ZnSe/CdSe[9], ZnS/CdS[14] [15], Si/Ge, Si/GaAs, Si/InP Si/CdS [16], Si/TiO ₂ [17]

Table 2-1 Species of Homostructure and Heterostructure of Hierarchical Nanowires

2.1.2 나노와이어 성장(VLS mechanism)

나노와이어를 성장시키는데 사용되는 Source는 Vapor(VLS)와 Solution(SLS), Electrodeposition 방법 등 다양한 방법이 존재한다. 이중 고온에서 Vapor를 소스로 사용하였을 경우 높은 결정질의 나노와이어를 대면적으로 얻을 수 있다.

VLS(Vapor Liquid Solid)메커니즘은 1964년 Au를 촉매로 이용한 단결정 Si Nanowire를 성장시킬 수 있게 됨에 따라 주목 받았다. [18] 금속 촉매(Metal Catalyst)를 사용함으로써 Dislocation이 없는 1-D 단결정 구조를 성장시킬 수 있다는 점에서 다양한 물질에 대해 많은 연구가 진행되었다. VLS 나노 와이어 성장에서 공정에 대한 제어 및 설계를 위해서 필요한 것은 Pseudo Binary Phase Diagram의 이해가 필요하며 가장 기본적인 성장 메커니즘은 Figure 2-2에 표시되어 있는 상태도와 같이 3가지 단계로 기술할 수 있다.

첫째, 기판위의 Metal Catalyst가 반도체 물질을 흡수하여 합금(Alloy)를 형성한다. 이 때 Metal Catalyst의 부피가 상승하고, 고체에서 액체 상태로의 상변화(Transition)이 발생한다.

둘째, 이러한 합금물질이 반도체 물질을 포화(Saturation)상태 까지 흡수함에 따라 Non-equilibrium 상태를 보전하기 위해서 반도체 물질의 Nucleation을 형성함으로써 Equilibrium 상태를 유지하고자 한다.

셋째, 이러한 합금의 Liquid Phase와 반도체 물질의 Solid Phase의 Steady State가 형성됨에 따라 석출된 반도체 물질에서의 성장이 Liquid/Solid 계면에서의 성장보다 에너지 적으로 유리하기 때문에 석출된 반도체 물질 위에 지속적으로 와이어가 성장하게 된다.

VLS 메커니즘을 따르는 나노와이어의 외형적 특징으로

첫째, 기판위에 형성되는 합금 입자의 크기에 따라 나노와이어의 직경이 결정되며, 물질의 성장 속도와 시간에 따라서 길이가 결정된다.

둘째, 성장과정 종료 후 온도를 감소시킴에 따라 Au를 사용하였을 경우 Alloy Droplet이 고형화되어 Tip의 끝부분에 남는 것이 VLS 메커니즘의 특징이다.

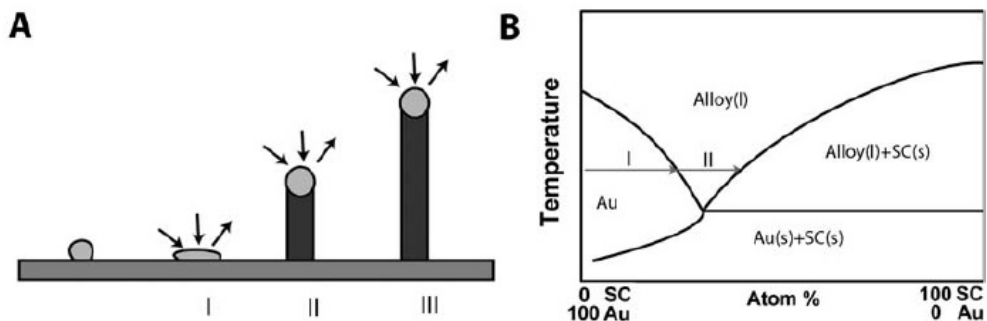


Figure 3.1(A) The stages of (I) alloying, (II) nucleation and (III) growth of nanowire synthesis according to the VLS growth mechanism.(B) Pseudobinary phase diagram of a semiconductor-gold system. The arrows indicate the subsequent phases when a gold droplet absorbs semiconductor material at a constant temperature. (I) At first, the gold particle is in the solid or liquid state. By absorbing semiconductor material, a liquid alloy is formed. (II) Subsequent absorption of more semiconductor material allows the liquid alloy to be in equilibrium with the solid semiconductor. Reproduced from reference (16).

Fig. 2-2 VLS Mechanism

2.1.3 Hierarchical Nanostructure의 기둥과 가지의 관계(Epitaxial Relationship)

Fig. 2-3의 SEM과 TEM 이미지에서 보이는 것과 같이 기판에서 자란 기둥과 기둥에서 자라나는 가지들은 특정 방향 또는 특정 각도를 가지고 가지가 성장되어 있음을 확인할 수 있다. 이러한 특정 방위각이 형성되는 이유는 기판의 결정면과 기둥의 결정 성장면, 기둥의 결정 성장면과 가지의 결정성장면의 차이에 의해 발생하는 것으로 이러한 원인은 일차적으로 촉매와 기판간, 가지와 기둥의 표면에너지와 열역학적 안정성 등이 복합적으로 연관되어 있다. 이러한 결정방위 확인의 중요성은 3차원 나노구조의 형성시 원하는 위치와 방위에 원하는 물질을 성장시켜 조밀하고, 다양한 기능을 구현하는 소자를 만들기 위해 연구가 진행되고 있다.

명확한 결정 방위를 확인할 수 있는 방법은 TEM을 이용한 방법으로 기둥과 가지가 TEM을 찍을 수 있는 두께 스케일 일 때 확인이 가능하며, TEM의 측정 기능에서 HRTEM 이미지를 통한 FFT(Fourier Fast Transformation), DP(Diffraction Pattern), DF(Dark Field Image)의 분석을 통하여 이러한 나노 구조의 기둥과 가지의 방위 관계를 확인할 수 있다. 대부분 이러한 결정방위의 연관성은 현상학적인 측면이 부각되는 구조적인 성장에서 성장 메커니즘에 대한 보조자료로서 사용된다.

이러한 예로는 Fig. 2-3의 왼쪽의 $WO_{3-\delta}$, InAs Hierarchical 구조의 분석에서 잘 나타난다. $WO_{3-\delta}$ Hierarchical 구조에서 90도의 결정방위로 자라는 각 가지의 결정방위를 DP를 통하여 $[002] \perp [020]$ 의 방위 관계를 확인하여 이를 통한 3차원 차원 입체 구조 형성에 대해서 이야기 할 수 있다. 오른쪽의 InAs Hierarchical 구조의 경우도 약 120도와 60도를 이루는 각각의 가지에 대해 Wurtzite

Hexagonal와 Cubic 결정구조 Indexing을 통한 기판과 기둥과의 관계, 기둥과 가지의 결정 방위에 대해서 확인하였다.

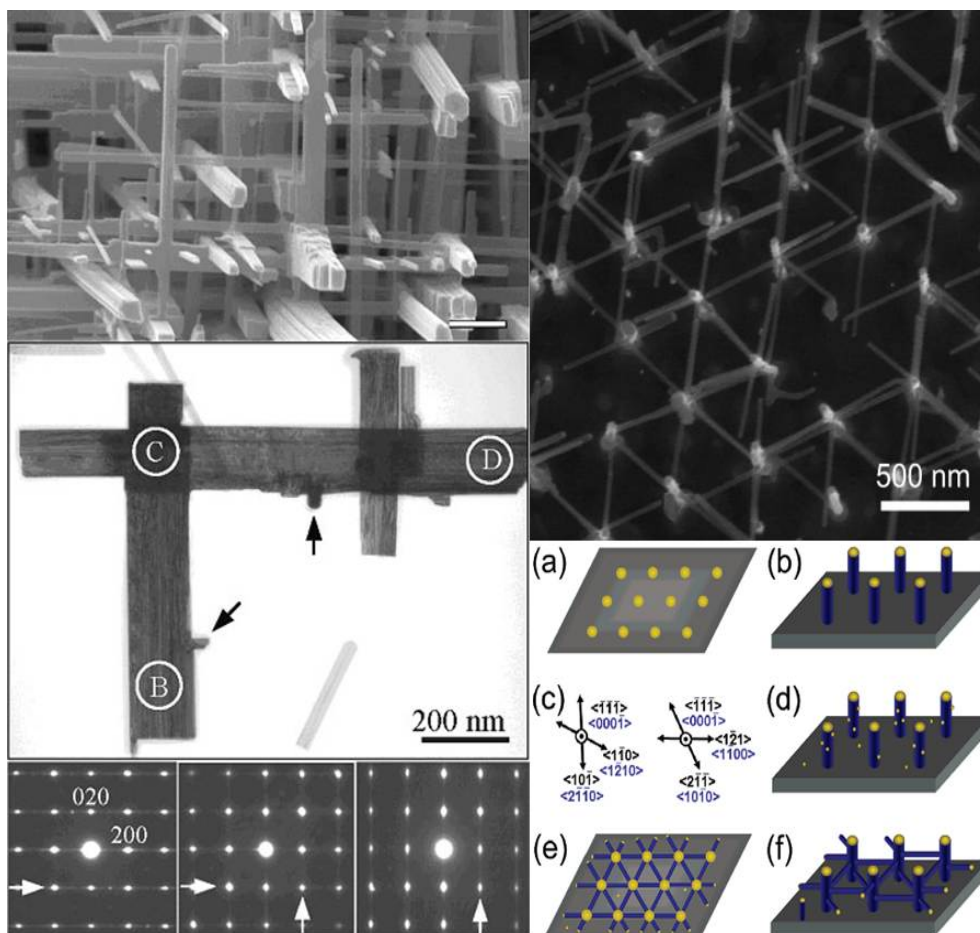


Fig. 2-3 (Left) $\text{WO}_{3-\delta}$ Hierarchical Structure SEM, TEM Image and Diffraction Pattern of B-D, (Right) InAs SEM Image and Scheme of Growth Mechanism.

2.1.4 Hierarchical Nanostructure의 응용

Hierarchical 구조에 대한 응용은 기본적으로 나노 와이어에서의 Core-shell 구조에서 구현할 수 있는 디바이스에 대해서 Heterostructure에서 또한 구현이 가능하다. 이는 $p-n$ 접합의 형성이 가능하기 때문으로 이를 통하여 전자소자, 광전자소자, 바이오센서, 태양전지 분야의 다양한 접목 가능성을 가진다.(Fig. 2-4) [16]

또한 Homostructure를 가질 때에는 구조적인 장점을 활용할 수 있다. 1차원 나노와이어 일 때의 부피 대 표면의 비(Aspect Ratio)보다 Hierarchical 구조일 경우 월등히 표면적의 비가 늘어나는 것을 활용하는 것으로 이러한 표면적의 상승은 외부 자극에 대한 반응 면적이 늘어나는 효과와 같이 화학반응, 빛과의 반응 면적 증대에 따라 에너지 분야인 태양전지에서 TiO_2 를 이용한 염료감응 태양전지(DSSC, Dye Sensitized Solar Cell)와 PEC (Photoelectrochemical Solar Cell)의 전극으로 사용할 수 있는 결과가 보고되었다. [10] [17] 이는 DSSC에서의 염료와 반도체 사이의 반응 면적 증가, PEC에서는 전해질과 반도체 사이의 반응 면적 증가로 이해 될 수 있다.

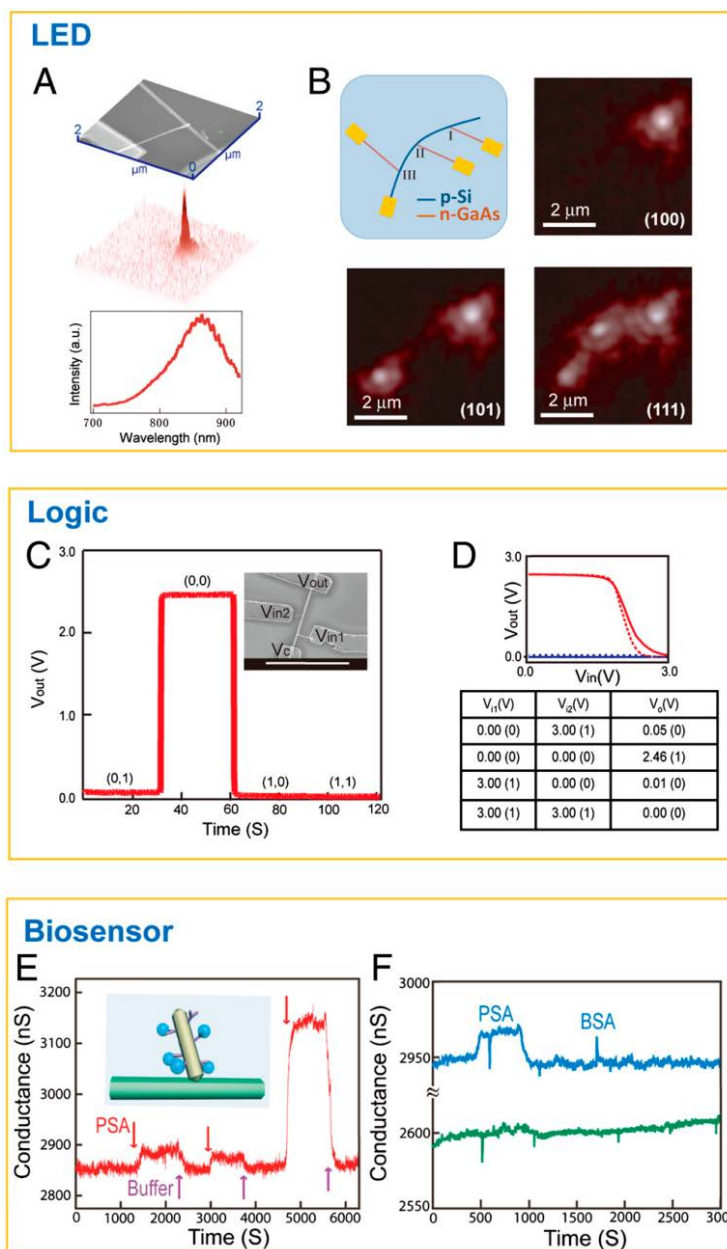


Fig. 2-4 Hierarchical Structure Application (A and B) LED, 3D EL Intensity, SEM Image, EL Spectrum of p -Si/ n -GaAs. (C and D) Logic Circuit, NOR Logic Gate based on two sequential Si/SiO₂/Ge, (E and F) Biosensor, Si/Au FET

2.2 CdTe, CdS의 물성 및 접합

2.2.1 CdTe의 물성

CdTe(Cadmium Telluride)는 II족인 카드뮴(Cd)과 VI족인 텔루륨(Tellurium)가 결합된 II-VI 화합물 반도체로서 구조로 잘 알려져있는 것은 Zincblend Cubic 구조를 가지나 고압 조건에서는 Wurtzite Hexagonal 구조를 가질 수 있다. Direct Energy Band gap을 가지며 차이는 1.44eV이다. 이는 태양광에 의한 이상적인 다이오드 에너지 변환 효율 계산 결과에 따라 최대 효율을 얻을 수 있는 에너지 밴드갭 값인 1.5eV와 유사하고, 또한 광흡수계수(Light Absorption Coefficient, α)가 $8 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$ 으로 높기 때문에 1950년 대부터 태양전지의 재료로서 연구되어 왔다. [1] 또한, 낮은 밴드갭에 따른 X-ray 흡수체로도 연구되고 있다. CdTe의 또 다른 특성으로는 일함수(Work Function)가 5.9eV로서 대부분 Schottky Contact을 하게 되어 전압강하가 발생하게 되는데, 이러한 전압강하에 따른 효율 저하를 해결하기 위한 연구 또한 진행되고 있다.

일반적으로 순수한 CdTe는 *p*-type 반도체 성질을 나타내지만 전기전도도가 매우 낮다.(Resistivity : $10^9 \Omega \text{cm}$) 따라서 이를 해결하기 위한 방법으로 도핑(doping) 공정이 요구되어 가장 대표적으로 알려진 도핑물질인 Cu를 이용한다.

CdTe는 비교적 결합력이 강하고 액상일 때와 기상일 때의 증기압 차이가 심하지 않은 특성 때문에 CdTe를 성장시키는데 제약사항이 적어서 다양한 방법을 이용하여 증착될 수 있다. 이러한 특성은 특히 대면적 태양전지 제작에 유리하다.

CdTe는 매우 다양한 방법으로 증착할 수 있으며 대표적으로 스퍼

터링(Sputtering), Evaporation, Electrodeposition, CSS (Close-Spaced Sublimation)가 있지만 실제 태양전지 양산에 있어서 First Solar사에서 개발한 VTD(Vapor Transport Deposition) 방법을 이용하여 모듈 제조시에 가장 높은 효율을 보인다.

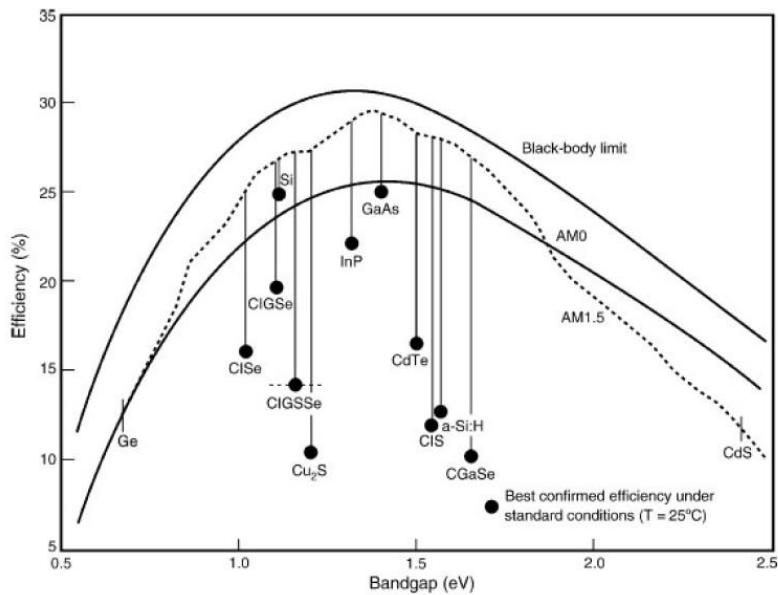


Fig. 2-5 Theoretical Efficiency for given Bandgap using AM 0 and 1.5 Illumination

2.2.2 CdS의 물성 및 나노와이어 성장

CdS(Cadmium Sulfide) 또한 II족인 Cd와 VI족인 Sulfur가 결합된 II-VI 화합물 반도체로서 구조는 Wurtzite Hexagonal, Zinc blende Cubic 구조를 가지나 Wurtzite Hexagonal 구조가 더 안정하다. CdTe와 마찬가지로 Direct Energy Bandgap을 가지며 차이는 2.42eV로서 이는 가시광선 영역대의 파장으로서 약 $0.55\mu\text{m}$ 이상의 파장의 빛을 흡수하기 때문에 노란색의 빛깔을 띤다. CdS의 일함수는 4.6eV이며 In, Ga, Al 등을 도핑함으로써 낮은 저항값을 가질 수 있다.

일반적으로 CdS는 가시광선과 적외선 영역에서 빛의 흡수에 따라 Conductivity가 증가하는 Photoresistor 물질로 사용되고, 밴드갭에 따른 노란색을 띠기 때문에 색소로도 사용이 될 뿐 아니라, 박막형 태양전지인 CdTe에서 *n*-type 반도체, CIGS($\text{Cu}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})\text{Se}_2$)에서는 *n*-type 버퍼층(Buffer Layer)으로 사용된다. 이렇게 CdS가 태양전지에서 주로 사용되는 이유는 *n*-type 물질과 접합을 이루었을 때 가장 좋은 효율을 보이고 있기 때문이며, 그 이유는 표면 재결합 센터(SRC, Surface Recombination Center)가 효과적으로 보호되기 때문으로 알려져 있다. [19]

CdS를 성장시키는 방법은 스퍼터링(Sputtering), 화학기상증착법(Chemical Vapor Deposition), 열분해법(Spray Pyrolysis), CBD(Chemical Bath Depotion) 등이 존재한다.

CdTe/CdS 이중접합 태양전지의 경우 윈도우층에 요구되는 특성은 가시광선 영역에서 높은 광투과율을 가지고 전기적으로 비저항이 낮아야 한다. 이는 투과량의 증가로 흡수층에서의 광 흡수량이 증가하고, 저항에 따른 에너지 손실을 줄일 수 있기 때문이다.

CdS는 적절한 성장 조건하에서 낮은 비저항과 가시광선 영역에서

높은 광투과율을 가진다. 특히 CdTe와는 에너지 밴드갭 차이가 크고, 두 물질간의 격자상수와 열 팽창계수의 차가 크지 않기 때문에 이로 인해 CdTe, CIGS 태양전지 등의 윈도우층으로 많이 사용된다.

CdS에 대한 나노와이어의 VLS 메커니즘을 이용한 성장은 2006 년 Nanotechnology에 보고되었으며, 실험상 존재하는 구조는 나노 와이어뿐만 아니라 나노벨트(Nanobelt)의 형상을 가지고 성장 방향은 3가지로 $[0002]$, $[01\bar{1}0]$, $[2\bar{1}\bar{1}0]$ 방향으로 성장할 수 있음이 나타나 있다.(Fig. 2-8, Table 2-2) [20]

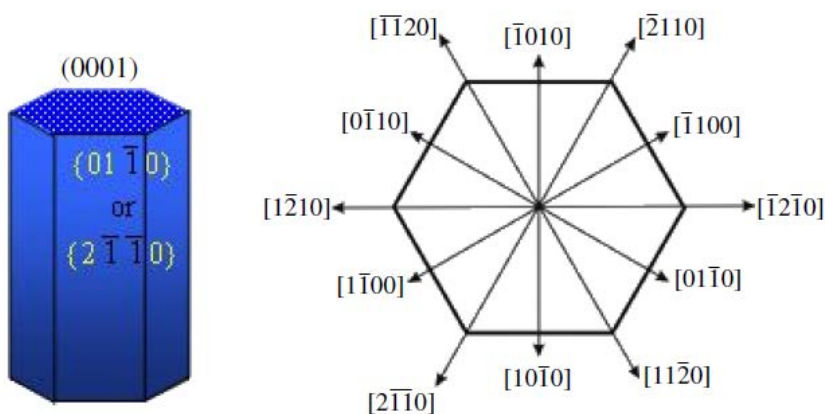


Fig. 2-6 (Left) $[0002]$ CdS Nanowire Morphology (Right) Cross-section View

Growth direction	$[0001]$		$[01\bar{1}0]$		$[2\bar{1}\bar{1}0]$	
Top surface	$\pm(01\bar{1}0)$	$\pm(2\bar{1}\bar{1}0)$	$\pm(2\bar{1}\bar{1}0)$	$\pm(0001)$	$\pm(0001)$	$\pm(01\bar{1}0)$
Side surface	$\pm(2\bar{1}\bar{1}0)$	$\pm(01\bar{1}0)$	$\pm(0001)$	$\pm(2\bar{1}\bar{1}0)$	$\pm(01\bar{1}0)$	$\pm(0001)$

Table 2-2 CdS Nanobelt Growth Direction and Their Surface Planes

	CdS	CdTe
Structure (lattice parameter,nm)	Hexagonal (a : 0.414, c:0.6719)	Cubic (a : 6.481)
Space group	P6 ₃ Mc(186)	F $\bar{4}$ 3m(216)
Energy band gap (at 300K, bulk)	2.42eV (Direct)	1.44eV (Direct)
Work function	4.6eV	5.9ev
Effective mass (electron)	0.153~0.171	0.3
Effective mass (hole)	0.7~5	0.3
Electron mobility	400Cm ² /V • cm	600Cm ² /V • cm
Hole mobility	15Cm ² /V • cm	60Cm ² /V • cm
Thermal conductivity	0.2 W/K•cm	0.2 W/K•cm
Melting point	2023K	1365K

Table 2-3 Basic parameter data of CdS and CdTe

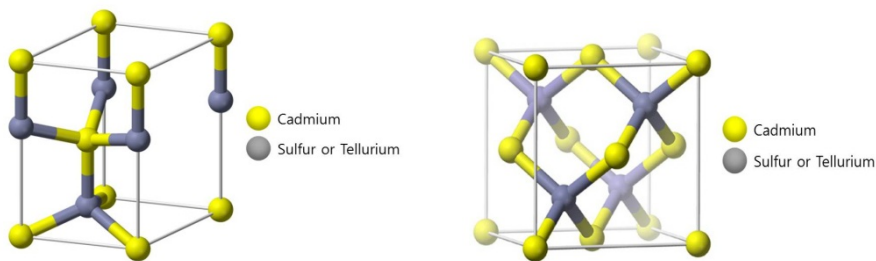


Fig. 2-7 Wurtzite Hexagonal Structure and Zincblende Cubic Structure

2.2.3 CdTe / CdS 접합 및 태양전지 응용의 한계

CdTe 태양전지에 사용되는 두 물질에 대해서 Table 1을 참조하여 비교하여 보면 가장 잘 알려진 두 물질의 증착시의 CdTe는 Cubic 구조로, CdS는 Hexagonal 구조로 증착된다. 이 때, 두 물질 간의 Lattice Mismatch는 약 10% 이다. 두 물질 모두 Direct Energy Bandgap을 가지고 있으며, 차이는 1eV 정도이다.

태양전지는 기본적으로 p - n 접합이 이루어져야 하는데 CdTe와 CdS 각각의 일함수(Work Function), 전자 친화도(Electron Affinity), 에너지 밴드갭에 의해 CdS는 n -type, CdTe는 p -type을 형성함으로 접합 특성이 나타난다. 이러한 이종 접합(Heterojunction)의 특징은 동종 접합(Homojunction)과는 다르게 두 물질 간의 전자 친화도와 에너지 밴드갭의 차이에 따라 Conduction Band Energy 차이(ΔE_c), Valence Band Energy 차이(ΔE_v)가 존재한다. (Fig. 2-8)

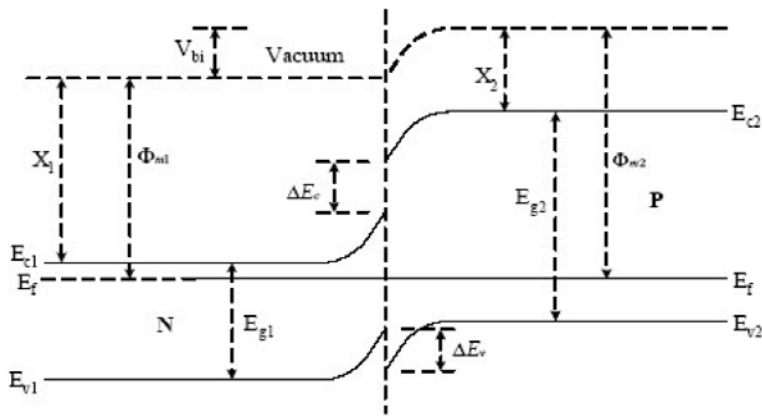


Fig. 2-8 Energy Band Diagram after Junction Formation

이러한 구조를 형성하였을 때에 발생하는 다이오드 특성과 CdS와 CdTe의 물성 및 장점을 이용한 두 물질에 대한 적용은 태양전지 분야에서 두드러진다. 에너지효율은 단결정 Si 태양전지에는 미치지 못하지만 CdTe가 포함된 II-VI족 물질이 Si 물질의 한계를 벗어나 독특한 화합물 반도체의 높은 광흡수율로 인해 높은 효율이 기대되어 많은 연구가 이루어지고 있다. 실제 First Solar사에 의해서 상용화된 CdTe 태양전지가 양산되고 있다. 발표된 CdTe/CdS polycrystal 태양전지의 최대 효율을 실험실 규모에서는 약 17%, 실제 모듈에서는 약 13%의 효율을 기록하고있다. [21]

CdTe 태양전지의 이론적 효율은 약 27%이다. 하지만 이러한 박막 형태의 태양전지에서 이론적 효율과 실제효율과의 차이점은 가장 기초적으로 두 태양전지의 구조적 차이에 기인한다. 일반적 박막 태양전지는 *p*-type Region인 CdTe 흡수층에서 빛의 흡수와 캐리어 수집(Carrier collection)이 같은 방향으로 발생하기 때문에 빛의 흡수와 Minority Carrier Diffusion Length와의 상충 관계가 발생한다.

아래의 식은 Core-shell 구조를 모델로 Drift/Diffusion Equation, Current Continuity Equation, Poisson' s Equation을 고려하였을 때, Current Density와 Voltage간의 관계를 나타낸 식으로 Dark와 Light Generate Current의 Thickness L에 의하여 박막 태양전지의 한계를 설명할 수 있다. [22]

$$J = (J_0^p + J_0^n) (e^{qV/kT} - 1) - J_l^p - J_l^n$$

$$J_0 \propto (1 - e^{-\alpha L})$$

$$J_l \propto L$$

J_0 : Quasineutral Part Dark Current Density

J_l : Quasineutral Part Light Generate Current Density

A : Absorption Coefficient

L : Thin Film Thickness

위의 식에서 확인할 수 있 듯, Dark Current Density는 두께가 증가할수록 지수함수 적으로 감소하지만, 빛에 의해 생성되는 Current Density는 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 박막의 두께가 두꺼울수록 캐리어 수집률이 감소하며, 최대 효율을 위하여 박막 두께를 최적화 시켜야 한다.

다른 효율 저하의 원인으로는 Crystal Quality에 따른 Electron Mobility의 저하 및 밴드구조에서의 트랩준위 발생, 입사하는 빛의 Reflection과 Light Trapping의 효율성, Junction을 이룰 때의 Strain에 따른 Surface Charge Trap 등 다양한 요인들이 작용한다.

Minority Carrier Diffusion Length와 Electron Mobility를 늘리기 위해서는 고순도의 단결정 물질이 사용되었을 경우 Defect에 의한 효율 저하 현상을 줄일 수 있다. 하지만 박막형태로 대량 생산체제로 이러한 단결정 성장이 다양한 변수가 작용하기 때문에 어려울 뿐 아니라 비용이 많이 소모되는 단점이 생긴다.

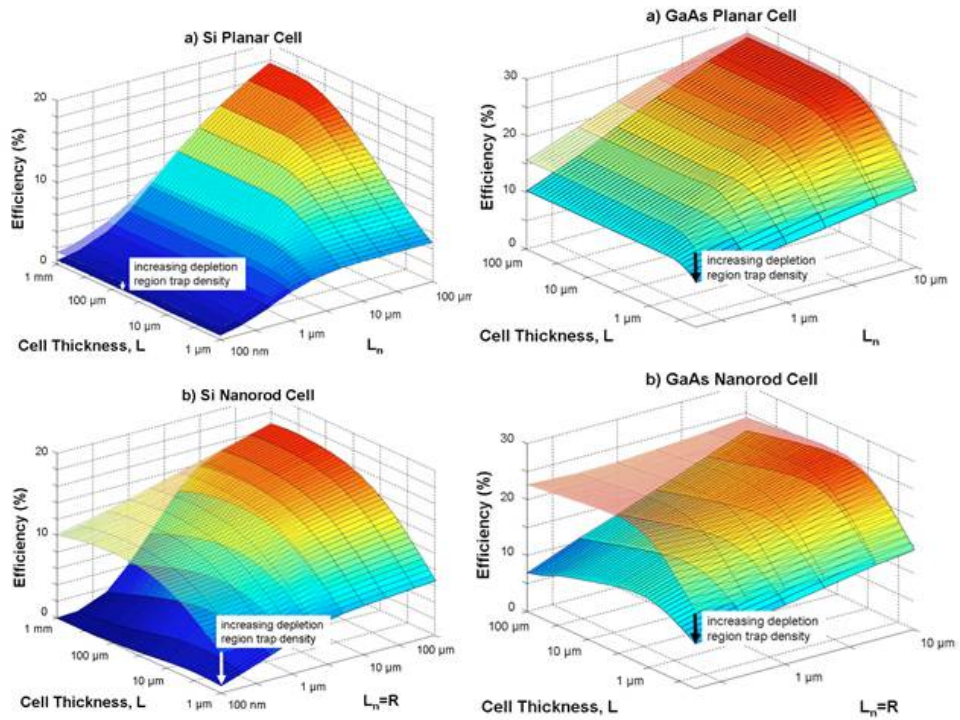


Fig. 2-9 Simulation Data of Efficiency versus Solar Cell Thickness L and Minority Carrier Diffusion Length L_n for a Planar Cell and Radial Cell (Left) Si, (Right) GaAs

2.2.4 CdS / CdTe 나노구조의 응용

대면적으로 제조하기 위한 이론적, 실험적, 경제적 한계를 극복하기 위해서 나노 구조가 주목받고 있다. [23] 이는 Device의 집적화 및 소형화의 측면 뿐 아니라 High Quality Single Crystal로 구현할 수 있다는 점에서 Minority Carrier 확산길이, 재결합에서 야기될 수 있는 효율 저하, Electron Transport에 영향을 줄 수 있을 뿐 아니라 크기와 길이의 제어 가능, 배열에 따른 Reflection 감소와 그에 따른 Light Trapping 증가, 나노사이즈로 감에 따른 Quantum Confinement Effect에 따른 Band gap Tuning, Strain에 대한 저항 증가와 Defect에 의한 효율 저하에 대한 민감도 감소의 장점이 존재한다.

CdS / CdTe에서의 나노구조 접목에 대한 대표적인 연구는 Al 기판위에 CdS Nanopilla-array를 AAO를 이용하여 증착시킨 후 그 위에 다시 필름 형태의 CdTe를 증착하여 $p-n$ 특성을 만들어 태양전지구조를 만든 연구로서 약 6%의 효율을 보이는 특성을 확인하여 소자로서의 접목 가능성을 확인하였다. [24] 또한 영국 I. Forbes 연구실에서 Mo foil과 유리 기판위에서 CdS / CdTe Core-shell을 성장시켜 태양전지의 접목 가능성에 대해서 보고하였다. [25]

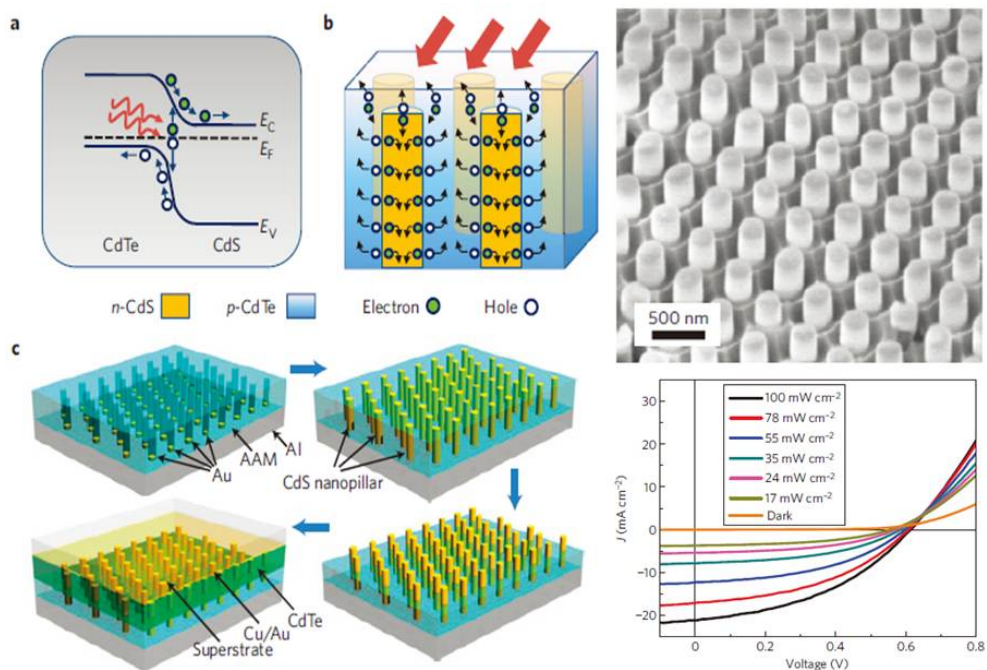


Fig. 2-10 CdS / CdTe Band Diagram, Schematic Diagram
Fabrication Flow, SEM Image, J-V Measurement Data

3. 실험 방법

3.1 시편의 성장

실험에 사용된 물질정보는 CdS Powder(Cadmium Sulfide, Alfa Aesar, #038342), CdTe Powder(Cadmium Telluride, Sigma-Aldrich, #256544), Bi Powder(Bismuth, Sigma-Aldrich, #264008), Au Pellet이다. CdS 성장시 VLS 메커니즘에 사용되는 촉매 중에서 본 실험에서는 Au를 사용하였으며, CdTe 성장시에는 Au와 Bi를 사용하였다.

기판은 세척된 SiO₂/Si 기판을 Thermal Evaporator에 넣은 후 Au를 수 nm 단위로 증착하였으며, 이 때 Source의 불균일에 의해서 nm 단위의 Au Island가 형성되어 나노와이어 성장 Seed로 작용된다.

성장 방법은 Tubular Furnace에서 CSS(Close-spaced sublimation) 방식을 이용하여 성장하였으며, 절차는 아래와 같다.

우선 Au로 코팅된 기판을 Furnace에 넣은 후 CdS를 Alumina Boat에 담아서 전반적으로 기판과 Alumina Boat가 Tubular Furnace에 정중앙에 위치시킨 후 Rotary Pump를 이용하여 기본 Base Pressure에서 최종 600~650 °C까지 올린 후 40분간 유지시키면 VLS Mechanism에 의해서 CdS가 성장한다. 성장 후 Ar Purge와 함께 온도를 낮춘다. 이 때의 샘플은 Fig. 3-1에서 CdS의 Bandgap에 따라서 노란색을 띠는 것을 확인할 수 있다.

CdTe의 이차성장도 첫 번째 CdS의 성장과 같은 방식으로 증착시키나 이 때의 Au는 nm 단위로 코팅시켜서 최종온도 450~500 °C에서 90분간 증착 시키면 CdS / CdTe Heterostructure가 형성된다. 이 때 색은 CdTe의 Bandgap에 따라서 가시광선 영역대의 흡수로

인해 검은색을 띤다.



<CdS First Growth>



<CdTe Second Growth>

Fig. 3-1 Color of CdS / CdTe Heterostructure Sample after First and Second Growth

3.2 SEM, XRD, PL, CL의 측정

분석은 Macroscale에서 Microscale로 이루어져야 하기 때문에 TEM을 이용한 분석 이전에 나노와이어 성장시 기본적으로 측정하는 SEM, XRD, PL 등의 분석이 선행되어야 한다. SEM을 통한 샘플의 Morphology를 확인하기 위해서 Hierarchical 구조에서의 가지 형상을 확인하기 위하여 고배율이 필요하기 때문에 FE-SEM(Model명 : SUPRA 55VP, Carl Zeiss)을 이용하였으며, Sample 내에 Charge build-up 현상을 배제하기 위하여 전압을 2kV에서 측정하였다.

XRD는 Rigaku co. D/MAX-2500/PC 장비를 이용하여 40kV, 100mA의 조건에서 측정하였으며, 목적은 CdS와 CdTe에 대하여 각각의 결정구조 파악을 위해서 실시하였다. 측정 각도는 사전 문헌조사를 통하여 $\theta - 2\theta$ 측정을 Step size 0.02도, 분당 10도의 속도로 CdS와 CdTe의 결정구조를 확인할 수 있는 범위인 20도~90도 사이의 각도에 대해서 측정하였다.

PL의 측정은 비교군을 설정하기 위하여 CdS와 CdS / CdTe에 대한 샘플을 두가지로 준비하여 측정하였다. CdS만 성장시킨 샘플에 대해 PL을 측정하고, 다음으로 CdTe를 측정함으로써 2차 성장에 의한 Optical Property의 변화를 확인하기 위함이다. PL의 분해능은 최대 약 $1\mu\text{m}$ 로서 기판위에 성장된 샘플을 사용하였으며, 기본적으로 bulk CdS, CdTe의 에너지 갭이 약 512nm, 812nm에 해당하기에 레이저는 325nm 파장을 가진 He-Cd lase를 사용하였을 때 Exciton이 충분히 이루어질 수 있다고 판단하였다. He-Cd Laser 파워는 40mW, 레이저 면적은 $100\mu\text{m}^2$ 의 스펙 장비를 사용하였으며, Thermal Excitation 효과를 배제하고, Peak의 Intensity 증가를 위하여 저온 PL 조건(11K)에서 측정하였다. 이러한 측정은

CdS / CdTe 이종결합 구조 내에서의 Energy State를 확인하기 위한 것으로 각 물질에 대한 구조 형성시의 Quality에 대한 확인을 위해서 측정되었다.

CL은 SEM-CL과 TEM-CL을 사용하여 나노와이어의 성장 방향에 따른 Optical Property의 변화에 대해서 확인하고자 하였다. 이를 위하여 SEM-CL은 Gatan Co.의 Mono CL 3+를 사용하였으며 이때의 가속전압은 15kV로 Spectrum과 단파장 이미지(Monochromatic Image)를 측정하였다. TEM-CL은 보다 고배율에서 확인하기 위해 사용되었으며, JEOL-2010 장비에 서울대 김영운 교수님 연구실의 자체 제작된 TEM-CL 장비를 이용하여 측정하였다.

3.3 TEM 측정

3.3.1 TEM sample 제작

나노 와이어 샘플링에는 시중에 사용되는 Blade를 이용, 분산제를 Butanol을 사용하여 샘플링을 하였다. TEM Grid는 Tedpella Inc.의 제품 #280711 Mesh Grid를 사용하였으며, 결정성장 방향이 다른 두 가지 샘플에 대한 정확한 위치를 확인하기 위해서 TEM Grid를 절반으로 잘라 사용하였다. 본 샘플에서 나노와이어의 밀도가 매우 높기 때문에 2~3회 Blade 끝 부분을 이용하여 긁은 후 끝에 붙어있는 나노와이어를 Butanol을 사용하여 TEM Grid 위에 분산시킨 후 1일 동안 상온에서 건조하였다.

3.3.2 TEM 기본 관찰

TEM은 Technai사의 F20을 가속전압은 200V 조건하에 사용하였으며, EDAX사의 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)를 사용하여 성분 분석을 실시하였다.

TEM 내에서 만들어진 Sample에 대해서 저배율에서 확인하여 상대적으로 적은 밀도를 가진 Mesh에서 나노와이어를 확인하였다. 관찰된 위치는 잘려진 Grid 끝부분의 형태를 인지하여 여러 번 측정이 가능하도록 하였다. 샘플의 경향성은 Mesh내에 존재하는 Wire를 여러 개를 측정함으로써 전체적인 경향을 확인할 수 있다고 판단하였다.

각각의 기둥과 가지의 성분 분석을 위해서 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy) 분석을 통하여 Cd, S, Te, Bi, Au를 검출하였다. 나노 구조에서의 성분의 Profile을 확인하기 위하여 실린더 구조에서 반지름 방향으로 Line Profile을 측정하였다. 명확한 Profile 확인을 위하여 $Cd-L_{\alpha 1}$ & $Te-L_{\alpha 1}$, $Au-M_{\alpha 1}$ & $Bi-M_{\beta}$ &

S-K_{α1} Peak을 Window로 지정하여 FWHM(Full Width at Half Maxium)을 고려하여 각 성분의 분포를 확인하였다.(Fig. 3-2)

가지와 기둥의 성분을 확인 후 이에 대한 결정방위관계를 확인하기 위하여 회절패턴(Diffraction Pattern), HRTEM의 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용하여 결정 방위를 확인하였다. 가지의 직경과 길이가 매우 작기에 각각의 가지에 대한 Zone을 맞추는데 어렵다는 판단하에 우선적으로 기둥에 Zone을 맞춰 HR 이미지를 확인한 후 가지에 대한 HR을 찍어 결정관계를 확인하였다. DP는 TEM의 Selective Area Aperture 크기가 200nm 정도로 기둥과 가지가 겹치도록 하여 패턴을 얻었다.

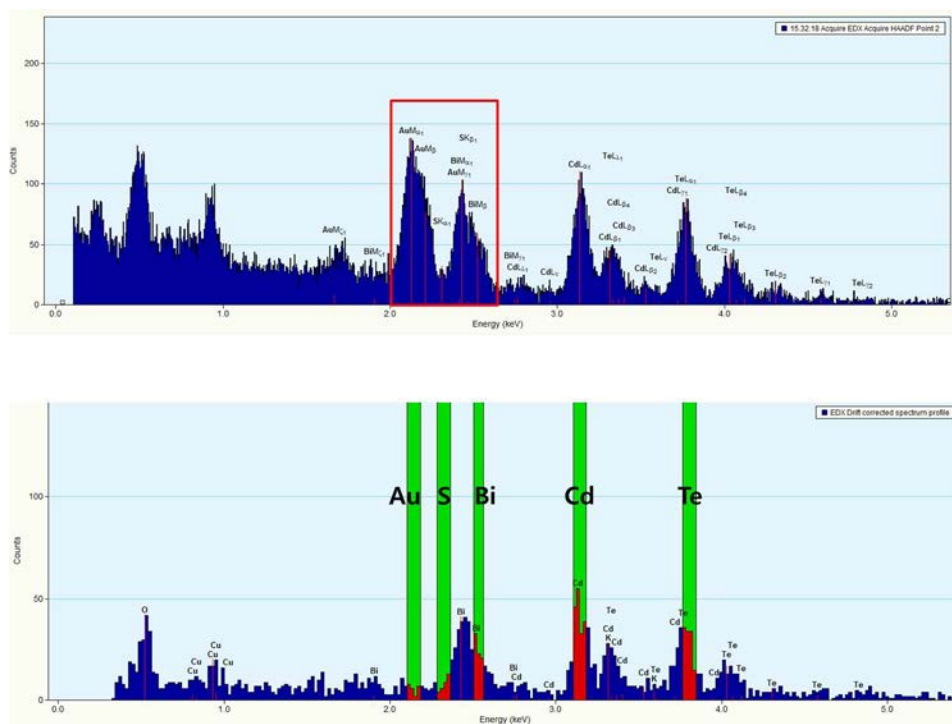


Fig. 3-2 EDS signal of Hierarchical CdS / CdTe Hetero structure Select the Element EDS Window for Accuracy Analysis

3.3.3 EELS 관찰

EDS를 통해 가지와 기둥을 이루는 구성 성분이 다른 것을 확인하였다. 이러한 구성 성분의 차이에 따라 기둥과 가지의 차이점을 확인하기 위하여 성장 방향이 다른 샘플에 대하여 EELS(Electron Energy Loss Spectroscopy)의 Low Loss EELS Spectrum을 Line Profile로 얻었다. 두께에 의한 영향을 배제하기 위하여 기둥은 직경이 약 50nm, 가지는 약 20nm인 부분에서 관측하였으며, 가지에서 Surface Plasmon 효과가 명확하게 확인되는 Au의 영향을 배제하기 위하여 EDS에서 Au가 존재하지 않는 부분을 측정하였다. 기둥 또한 명확히 CdS와 CdTe가 구별되는 부분에서 측정하여 각 성분에 의한 EELS 차이를 확인하였다. 스펙트럼에 대한 분석은 관련 논문을 인용하여 실제 얻은 데이터와 비교 분석하였다. [26] [27]

4. 실험결과

4.1 CdS / CdTe 기본 구조 및 성분 분석

4.1.1 Morphology 분석(SEM,TEM)

육안으로 확인되는 성장된 샘플의 색의 차이에 대한 Morphology의 연관성을 확인하기 위하여 FE-SEM을 이용하여 확인하였다. 저배율에서 확인하였을 때, 전반적인 나노와이어에 대한 덩불 형성은 밀도 있게 형성되어 있는 것을 확인하였다. Source에서 가까운 쪽과 먼 쪽의 차이점은 Fig. 4-1의 배율이 8만배로 고정하여 측정한 SEM 이미지에서 확인할 수 있다.

가장 두드러지는 차이점은 기둥에 붙어있는 가지의 밀도로서 소스와 가까운 쪽이 더 밀도가 높아보이는 데 반하여 먼 쪽에서는 Branch의 상대적인 밀도가 적음을 확인할 수 있다. 기둥과 가지의 길이 특성은 Source에서 가까운쪽은 기둥의 두께가 약 200nm, 가지의 길이도 약 200nm이며, 먼쪽은 기둥의 두께는 약 100nm, 가지의 길이도 약 100nm으로 관측되는데 이는 Source의 Transport가 위치에 따라 차이가 있다는 일반적인 특성으로 이해될 수 있다. 또한 가까운 쪽과 먼 쪽의 색의 차이는 빛의 흡수와 관련하여

$$I = I_0 \text{Exp}(-\alpha x)$$

I : Transmitted intensity of light

I_0 : Incident intensity of light

α : Absorption Coefficient

x : Thickness

의 관계식에서 x , 즉, 나노와이어 두께가 Source에 가까울수록 증가하기 때문에 두께에 따른 빛의 흡수량이 많아짐에 의해 Contrast의 차이 나는 것으로 판단할 수 있다.

TEM을 통한 저배율 관찰은 SEM에서 관찰한 것과 유사한 결과를 보였다. 다만 샘플을 만드는 방법이 인위적인 물리적인 힘을 가해 만드는 것이었기 때문에 상대적으로 Aspect Ratio가 큰 나노와이어가 쉽게 손상된 것을 확인할 수 있었다. 따라서 내부에 존재하는 샘플의 크기는 일정하지 않은 것을 확인할 수 있다. 하지만 SEM에서 보았던 것과 마찬가지로 기둥과 가지의 형상을 확인할 수 있었으며 각 샘플에 따라 가지의 밀도와 형상이 약간씩의 차이점이 있음을 확인할 수 있다.

또한 Fig. 4-1의 SEM 이미지와 Fig. 4-2 TEM 이미지 상에서 사전 문헌조사에서 조사된 바와 같이 특정 방향으로 자란 기둥에 대해 2차적으로 자란 가지 형상이 특정 방향을 가지고 성장하고 있음을 확인할 수 있다.

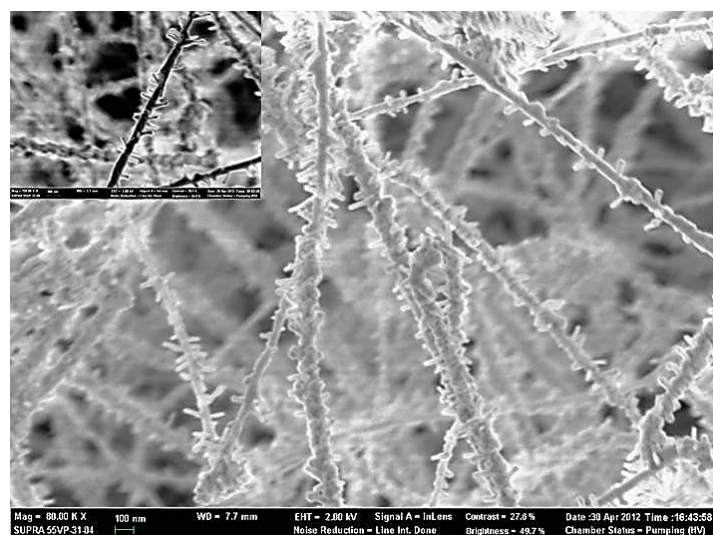
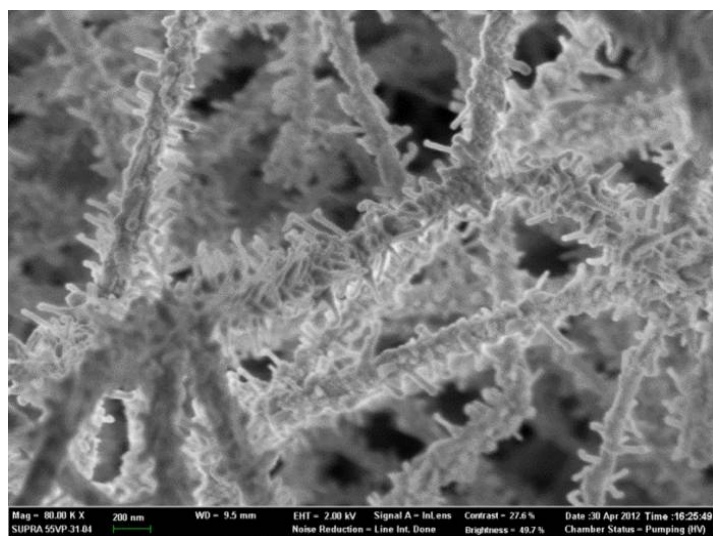


Fig. 4-1 CdS / CdTe Hierarchical Sturcture Morphology Image. (Top) Close to the Source (Down) Far from the Source

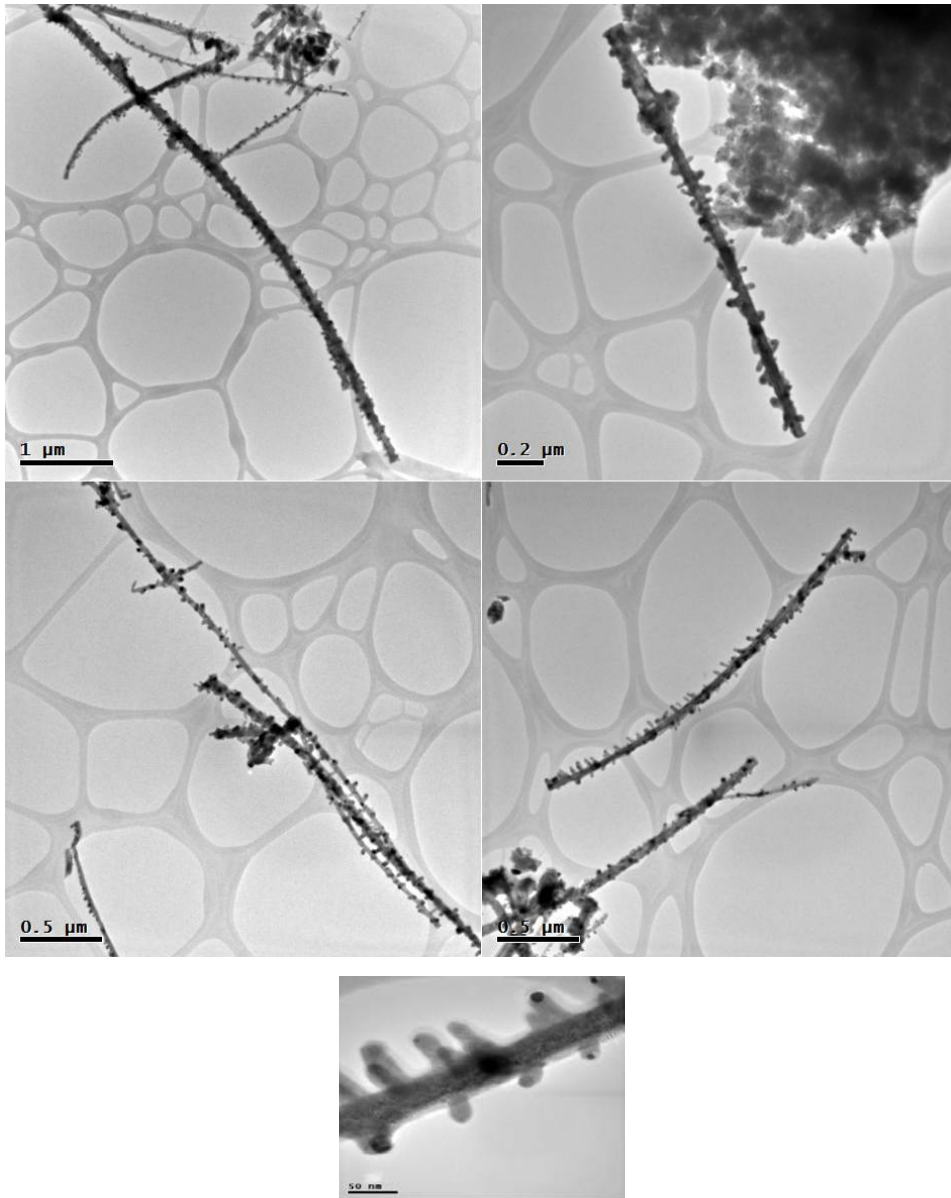


Fig. 4-2 Various Hierarchical Nanowire Low Mag TEM Image with Directionality Branchs (Top) Growth Direction : $[11\bar{2}0]$ (Middle) Growth Direction : $[0002]$

4.1.2 XRD 결정구조 분석

TEM의 회절패턴과 HRTEM을 통한 FFT 분석에 앞서 XRD 측정에 대한 결과는 Fig. 4-3과 같다. XRD 측정결과는 각각 H-CdS(JCPDS : 41-1049), H-CdTe(JCPDS : 19-0193)를 이용하여 각각 Indexing 되었지만 안에 첨가된 Au와 Bi에 대한 Peak은 명확하게 확인되지 않았다.

위의 H-CdS, CdTe에 대한 결과는 기존에 CdS와 CdTe로 이루어진 이중구조에서 알려져있는 구조가 아니다. 따라서, 두 물질의 Hexagonal 구조의 형성은 CdTe 박막 태양전지의 물성과는 다른 특성을 기대할 수 있을 것이라 판단하였다.

XRD 데이터의 내에서 H-CdS는 다양한 면지수에 대해서 Indexing 되는데 반하여 H-CdTe는 $(10\bar{1}2)$ 면과 $(11\bar{2}0)$ 면만 확인되었다.

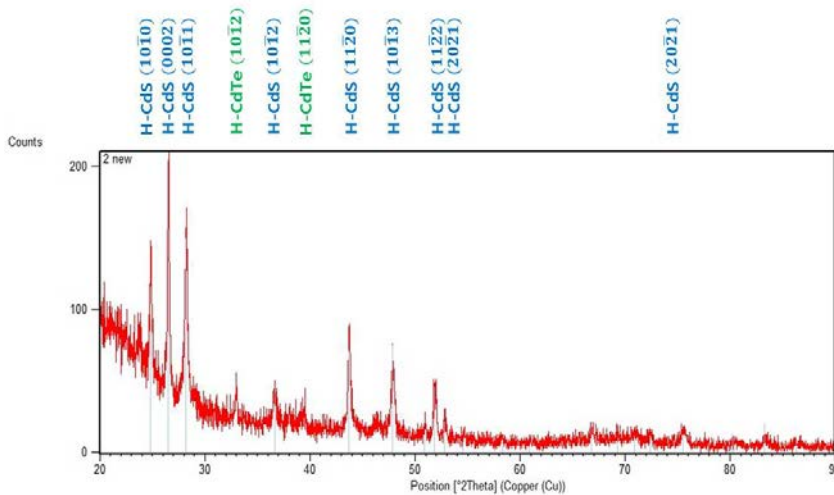


Fig. 4-3 XRD Data of Hierarchical CdS / CdTe Hetero structure (H-CdS JCPDS : 41-1049, H-CdTe JCPDS : 19-0193)

4.1.3 회절패턴을 이용한 구조 분석

다양한 나노와이어에 대한 회절패턴을 확인해 본 결과 각각의 Zone Axis를 $[2\bar{1}\bar{1}0]$, $[1\bar{1}00]$ 로 맞추었을 때, Fig. 4-2의 위 두 와이어는 $[11\bar{2}0]$ 으로, 아래의 두 와이어는 $[0002]$ 방향으로 성장함을 확인할 수 있었다. 각각의 회절패턴에서의 나노와이어의 성장방향은 따로 파란색 화살표로 표시하였으며, 화살표 방향으로 각각의 H-CdS와 H-CdTe의 Epitaxial Relationship이 확인 되었다. 이를 확인하기 위하여 JEMS Simulation Program을 통하여 재확인하여 각각의 회절패턴과 비교한 결과 정확하게 일치하는 것을 확인하였다.(Fig. 4-3)

TEM 모델인 F20에서의 가장 작은 Aperture 크기가 200nm로서 이는 와이어의 형상에서 기둥과 가지를 따로 따로 분리해서 찍을 수 없기 때문에 회절패턴은 기둥과 가지에서 동시에 나타난 것으로 판단하였으며 이 데이터만으로는 각각의 물질의 결정구조의 특성은 확인할 수 있으나 가지와 기둥간의 결정성장방향에 대해서는 확인할 수 없다고 결론하에 이는 더 자세히 HRTEM을 확인하여 FFT의 형상을 통해서만 가능하다고 판단하였다.

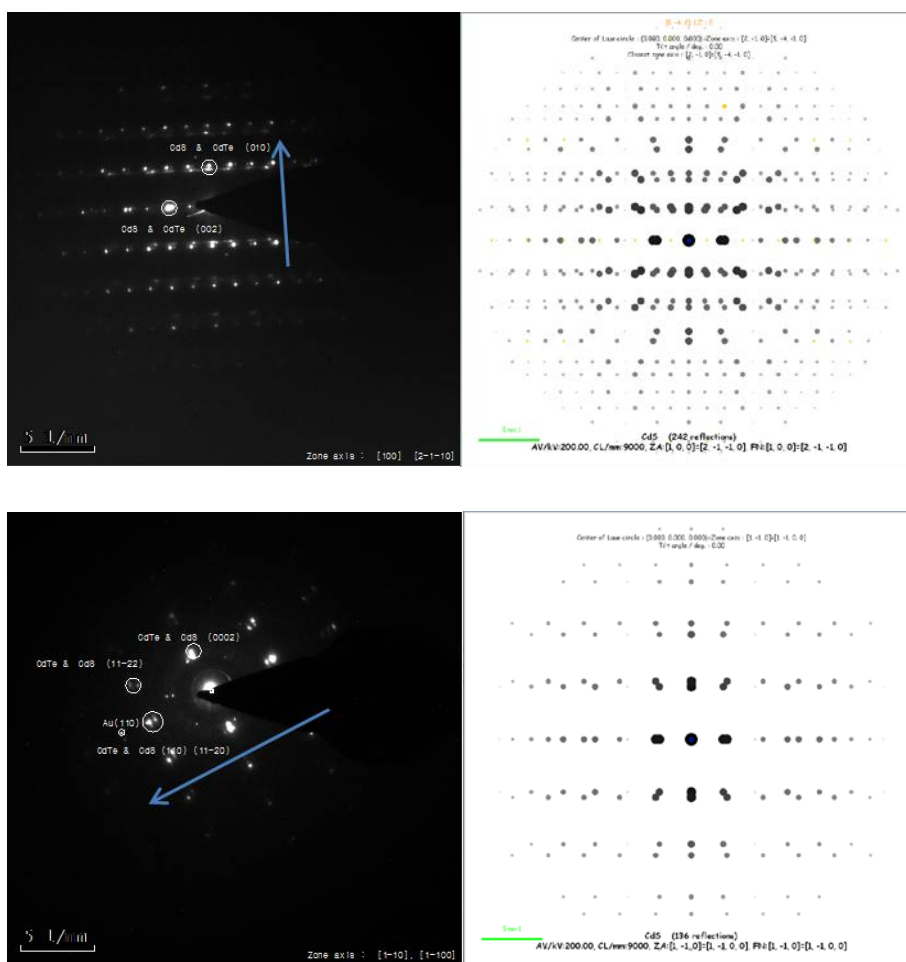


Fig. 4-4 Diffraction Pattern & JEMS Simulation Data (Top)
 Zone Axis : $[2\bar{1}\bar{1}0]$ (Down) $[1\bar{1}00]$

4.1.4 EDS 성분 분석

HRTEM 분석에 앞서 각각의 원소 성분이 Hierarchical 구조에서 어떻게 분포되고 있는지를 확인하여 회절패턴에 대한 명확한 정보를 분석하고자 하였다. 이를 확인하기 위하여 전반적인 Mapping보다는 Line Profile을 이용하여 확인하였다. 최초의 분석에서는 사용되는 TIA 프로그램에서 Auto Mapping을 이용하여 각각의 성분을 확인하였으나, 내부에 존재하는 Au, Bi, S의 egde가 반가폭(Full Width at Half Maximum)에 의해 해석의 오류가 발생하는 것을 확인하였다. 이를 해결하기 위해 특정 부분의 Energy Window를 설정하여 각각의 성분에 대해 Profile을 진행하여 Auto Mapping과는 다른 결과를 얻었으며 이 결과가 더욱 정확한 결과라 판단하였다.

Fig. 4-5에서 보는 것과 같이 가지에서부터 기둥까지 Line Profile을 확인하였을 때 확인되는 현상은 가지는 VLS 메커니즘에 입각하여 Catalyst에 의해 CdTe가 잘 형성되어있음을 확인할 수 있으나 기둥 부분은 CdTe가 CdS를 덮고 있는 결과가 나왔다. 또한 특이사항으로는 Bi의 존재로서 Au가 가지의 끝부분을 제외한 다른 영역에서 Noise Level로 Signal이 나온다고 판단한다면 Bi는 곳곳에 존재하며 특히 기둥의 양 끝단에 몰려있는 것으로 판단할 수 있다.

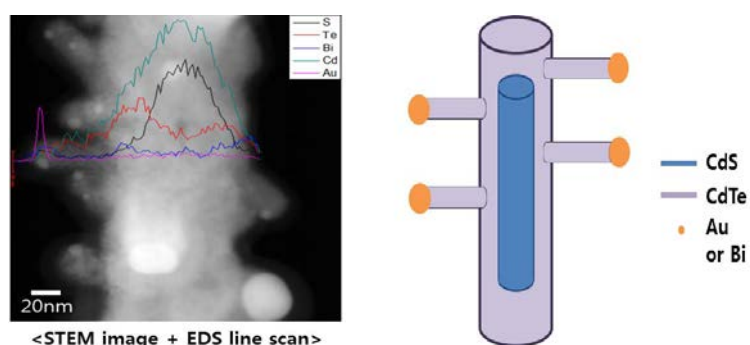


Fig. 4-5 EDS Analysis and Scheme of CdS / CdTe Hierarchical Structure

4.1.5 HRTEM 을 이용한 기둥 분석

가지와 기둥간의 결정성장방향 관계를 확인함에 앞서 모체가 되는 기둥의 H-CdS, CdTe의 관계를 명확하게 판단해야한다. HRTEM 모드에서 기둥에 대해 확인한 이미지는 Fig. 4-6과 같다. 성장 방향이 다른 두 이미지 내부를 자세히 확인하여 보면 규칙적인 선이 형성되어있는 것을 확인할 수 있다. 이는 Moire Fringe로서 이러한 선이 생성되는 이유는 CdS와 CdTe가 방향성을 가지고 접촉하고 있다는 증거이며, Moire Fringe가 형성되었을 때의 일어날 수 있는 다른 현상은 Double Diffraction Pattern이 형성되는 것으로 여기에서는 CdS Peak을 기준으로 CdTe의 Peak과 동일한 거리에 다른 Pattern이 형성되는 것을 알 수 있다. 이러한 규칙적인 선은 역격자 공간에서의 g vector의 차이에 의해 발생하는 것으로 Real Space에서는 면간거리의 차이에 의한 것임을 알 수 있다. 이를 계산을 통해서 명확하게 증명할 수 있다.

$$d_{tm}^{11\bar{2}0} = \frac{1}{g_{CdS}^{11\bar{2}0} - g_{CdTe}^{11\bar{2}0}} = \frac{1}{4.8298 - 4.3573} = 2.12nm$$
$$d_{tm}^{0002} = \frac{1}{g_{CdS}^{0002} - g_{CdTe}^{0002}} = \frac{1}{2.9762 - 2.6667} = 3.23nm$$

위의 이론적인 값에 대해서 Fig. 4-6에서 빨간색으로 표시한 것과 유사하게 일치하는 것을 확인할 수 있다.

이러한 특성은 기둥이 명확하게 Core-shell 구조를 이루고 있음을 확인할 수 있는 증거로 판단하였다.

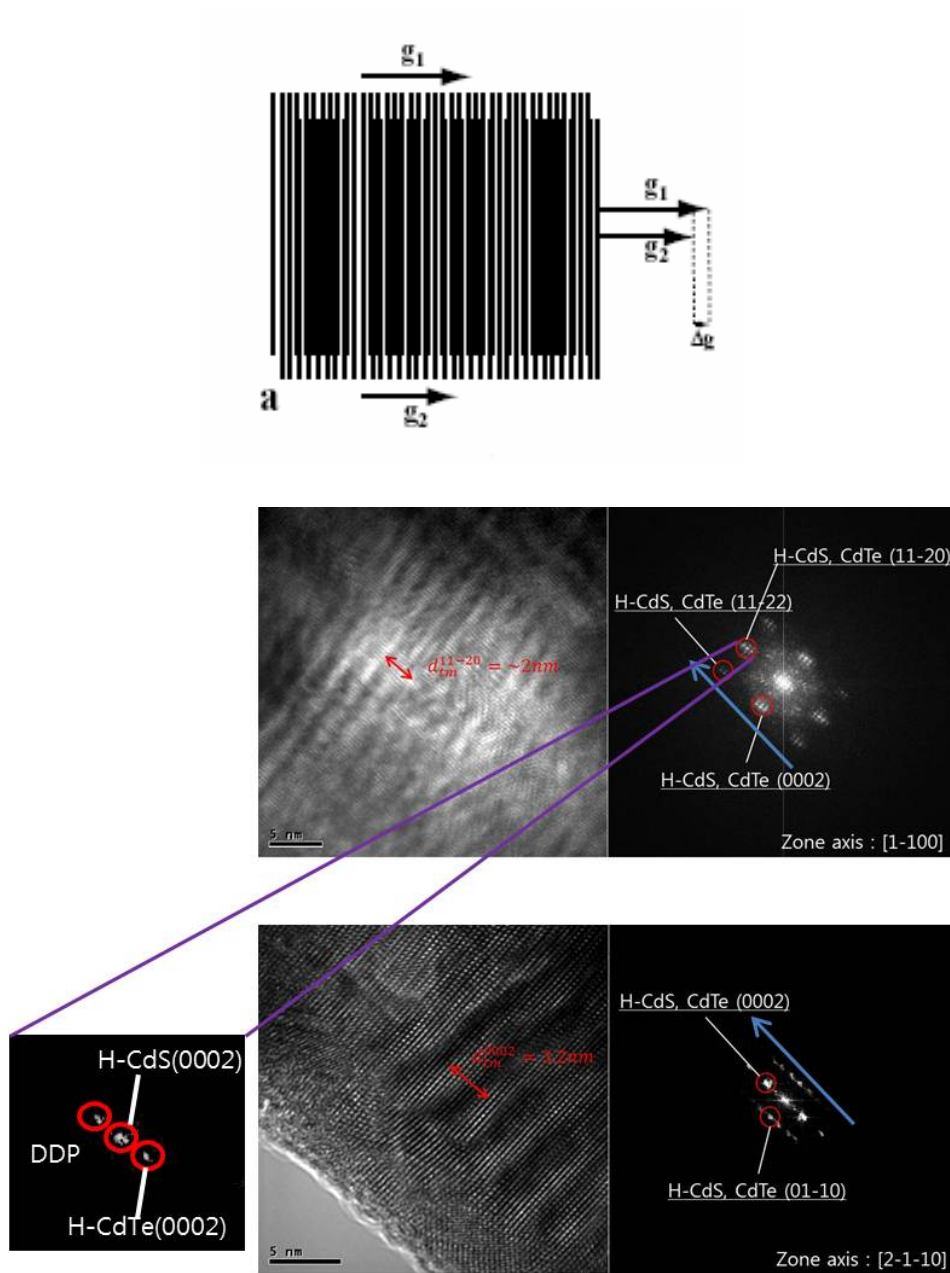


Fig. 4-6 (Top) Moiré Fringe Theoretical Image, (Down) Backbone HRTEM Image & FFT Analysis, (Inset) Double Diffraction Pattern Image (Arrow) Growth Direction

4.2 결정성장 방향에 따른 기둥과 가지의 관계

각각의 Zone axis를 맞춘 뒤 고배율에서 결정 성장방향에 따른 이미지는 Figure 4-7에 나타나 있다. 이미지 내에서의 가지와 기둥간의 결정성장방향이 기둥의 성장방향에 따라 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 이에 대해 HRTEM 분석과 EDS 분석을 통하여 기둥과 가지와의 결정성장방향에 대한 이해와 Morphology의 차이점을 확인하였다.

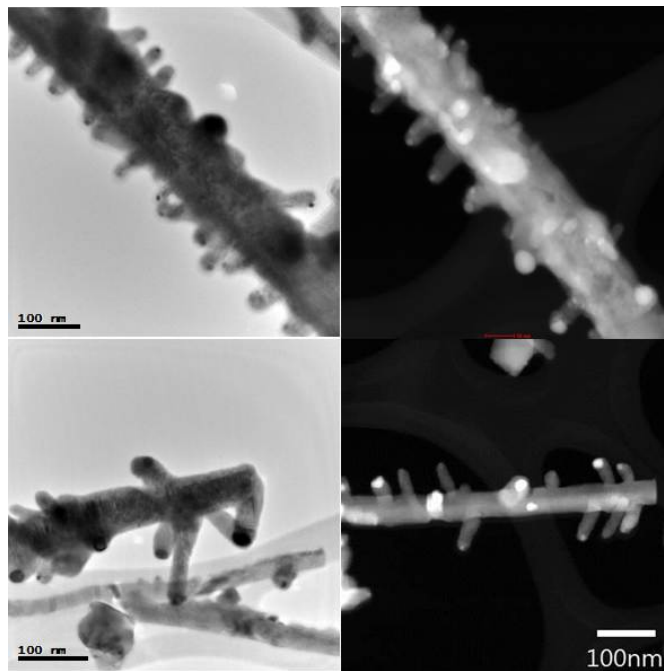


Fig. 4-7 High Magnification TEM Image & STEM Image
(Top) Growth Direction : $[11\bar{2}0]$ (Bottom) Growth Direction : $[0002]$

4.2.1 $[11\bar{2}0]$ 결정성장 방향

SEM의 이미지에서와는 달리 TEM에서의 가지의 길이는 Fig. 4-7과 Fig. 4-8에서와 같이 길이가 100nm 이하이다. 이로 인하여 가지 각각에 대해 Zone axis를 맞추는 것은 어려운 일이다. 이를 해결하기 위해 기둥에 zone axis를 맞춘 후 가지 부분에서 선택적으로 HR Image가 확인되는 것을 측정하였으며 그에 대한 결과는 Fig. 4-8(Middle),(Bottom)과 같다. 기둥에서 확인되는 FFT 패턴에서 CdS가 빠진 CdTe만 존재하는 명확한 패턴이 가지에서 확인되었다. 이는 가지는 단결정을 이루고 있으며, 기둥에서의 $[11\bar{2}0]_{\text{cds}} // [11\bar{2}0]_{\text{cdte}}$ 의 관계가 단순 확장 된 것으로 Equivalent한 면들이 단순히 기둥에서 연장 선상으로 성장되는 것으로 판단하였다. 이에 따른 가지와 기둥의 방향은 서로 90도, 수직인 관계가 형성됨을 확인 할 수 있으며, 이는 Hexagonal system 내에서 (0002)의 면과 $(11\bar{2}0)$ 의 면의 표면 에너지가 낮기 때문이라 판단할 수 있다. EDS를 통한 추가 분석에서도 Core-shell 구조가 지속적으로 확인되었다.

4.2.2 [0002] 결정성장 방향

기둥에서의 Epitaxial Relationship은 $[0002]_{\text{CdS}} // [0002]_{\text{CdTe}}$ 로 확인되나 FFT 패턴에서는 단결정 구조가 아닌 defect가 존재하는 패턴 사이에 Line이 형성되어 있는 것을 확인 할 수 있다. 이는 $[11\bar{2}0]$ 보다 Lattice Mismatch가 더 크기 때문에 형성되었다고 판단되었다. 이러한 Line의 형성은 여러 문헌에서 확인되는 것과 같이 Hexagonal 시스템 내에서의 Stacking Fault에 의한 현상으로 판단된다. 이에 대한 연장선상으로 가지에서도 기둥에서 확인되는 Defect가 존재하는 것을 확인하였다. 가지는 Equivalent한 면들로 형성된 것을 확인하였으며, 특이하게도 가지에 대한 방향은 $[\bar{1}2\bar{1}3]$ 으로 확인되었다. 또한 EDS를 통한 Morphology를 확인하였을 때, CdTe와 CdS가 서로 한쪽으로 치우쳐있는 것을 확인할 수 있었으며, 이 또한 Lattice Mismatch에 의한 Strain으로 인해 Morphology가 대칭적으로 형성되지 못한 것으로 판단하였다.

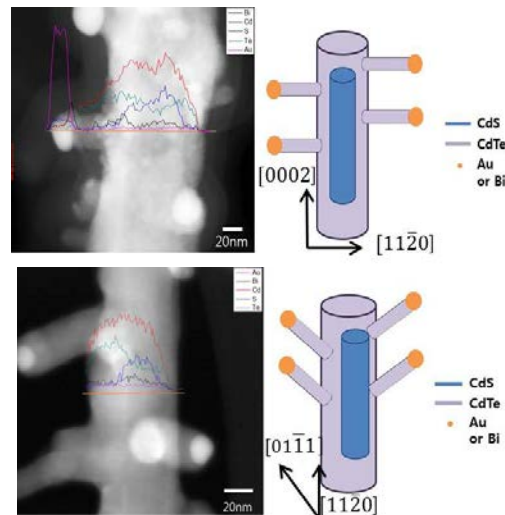


Fig. 4-8 $[11\bar{2}0]$, $[0002]$ STEM, EDS Image & Scheme

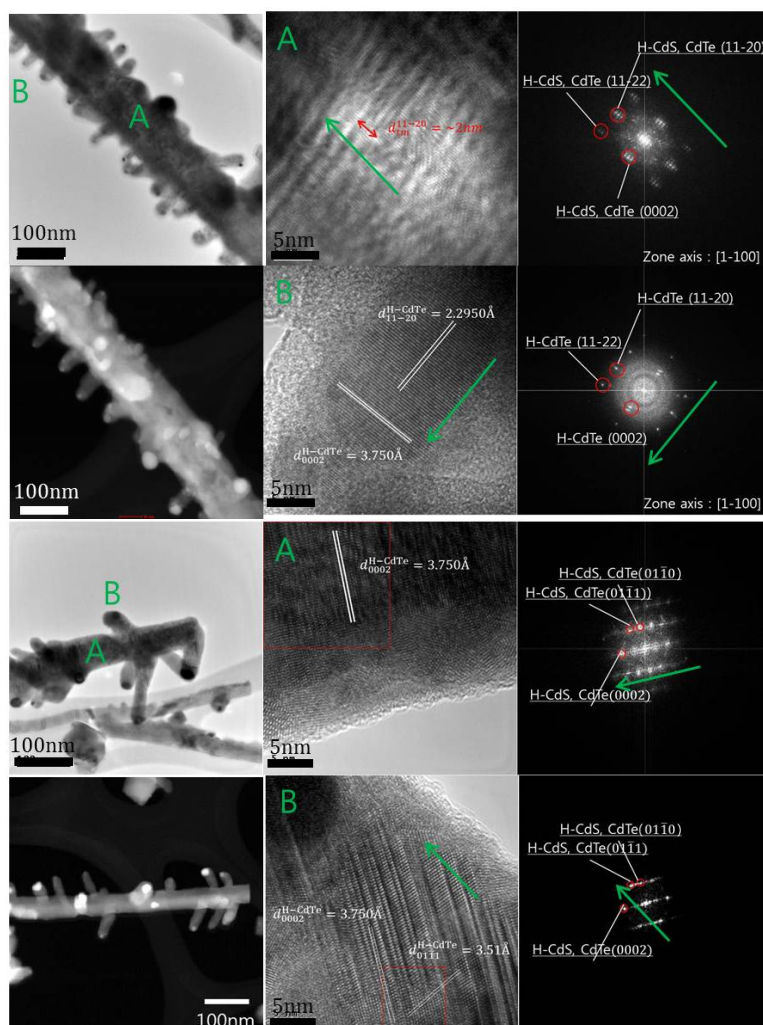


Fig. 4-9 Backbone / Branch HRTEM Image & FFT Analysis
(Top) $[11\bar{2}0]$ (Down) $[0002]$

4.3 기둥과 가지의 EELS 분석

Fig. 4-9 (c),(f), Fig. 4-10 (c),(f)는 각각 결정 성장방향에 따른 Low Loss EELS 결과로서 Line Profile에서 결정 성장 방향과 상관없이 기둥과 가지에서 12eV와 16eV에서 Peak이 확인되었다. 이 각각의 Peak은 CdTe의 Interband Transition과 Bulk Plasmon에 해당하는 Peak이다. [26] [27] 기둥과 가지가 비슷한 곳에서 측정하였기 때문에 직경에 따른 Peak에 대한 영향은 고려하지 않았으며, 기둥에서의 EDS를 통한 CdS와 Bi의 분포를 고려하였을 때 CdS의 위치와 Bi의 양보다는 CdTe가 주된 영향을 미치는 것으로 판단하였다.

다양한 EELS Data를 확인하였을 때, 기둥에서 확인되는 특이점은 Fig. 4-9 (c)와 Fig. 4-10 (c)의 빨간 화살표로 표시된 지점인 12eV에서 Interband Transition Peak Enhancement가 발생하는 현상을 확인하였다. 이 현상으로 16eV에 해당하는 Bulk Plasmon Peak보다 12eV의 Peak의 Intensity가 더 커지는 것을 기둥 내에서 Asymmetry하게 발생하는 것을 확인할 수 있는데 이는 가지에서는 확인할 수 없었다.

이러한 현상이 발생하는 위치의 공통적인 특성은 CdS / CdTe Core-shell 구조에서 CdTe의 두께가 30nm 이상인 위치에서 발생하는 것을 확인하였으며, 직경이 20nm인 가지에서는 확인되지 않음에 따라 결정화에 따라 변동될 수 있는 Interband Transition의 특성으로 유추하건데 CdTe의 직경 또는 두께가 30nm 이상인 기둥에서 CdTe 결정화가 더 잘 되어 이러한 특성이 확인 되는 것으로 판단하였다.

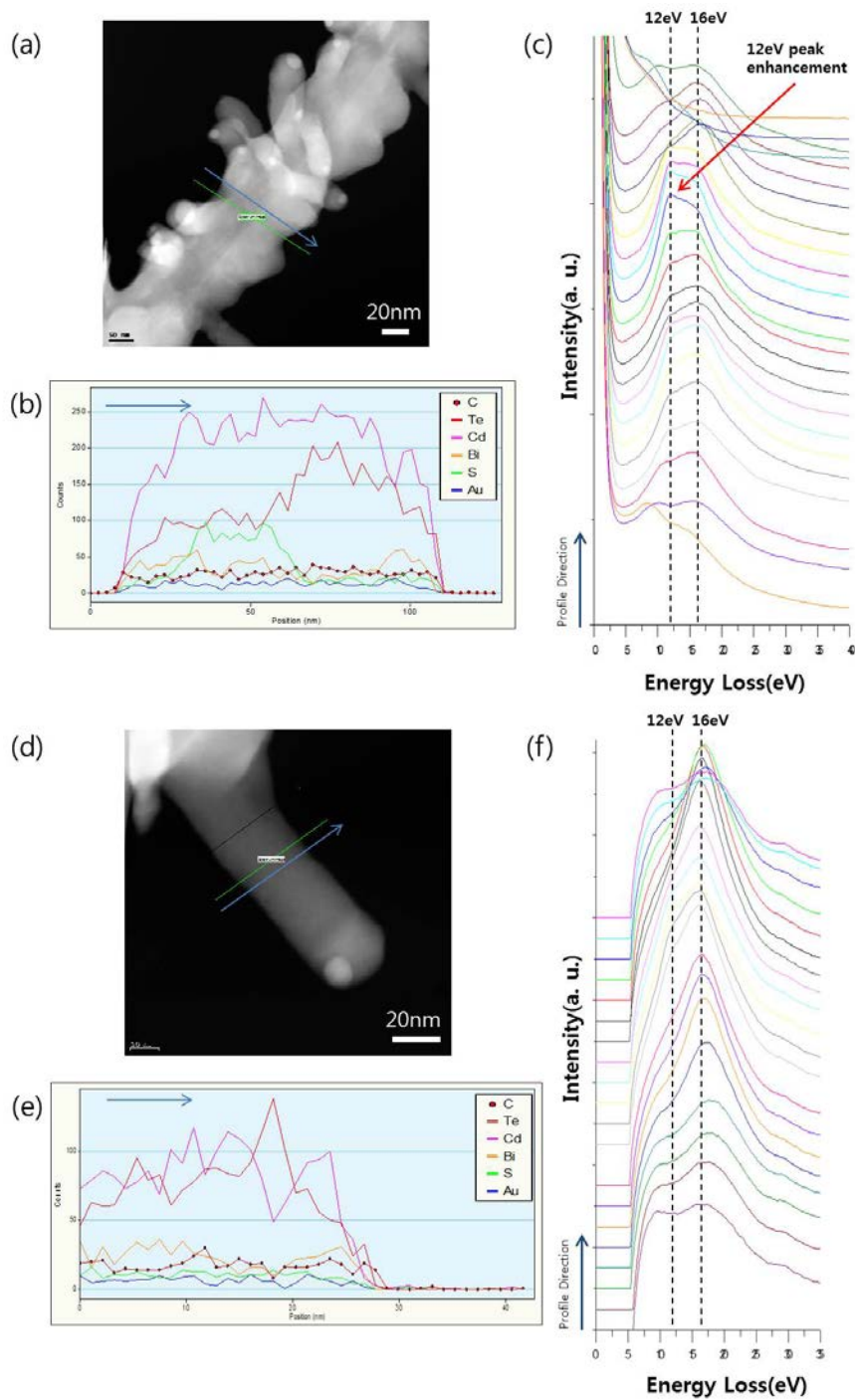


Fig. 4-10 Growth Direction [1120] (a) EELS Line Profile Region (b) EDS (C) EELS Data

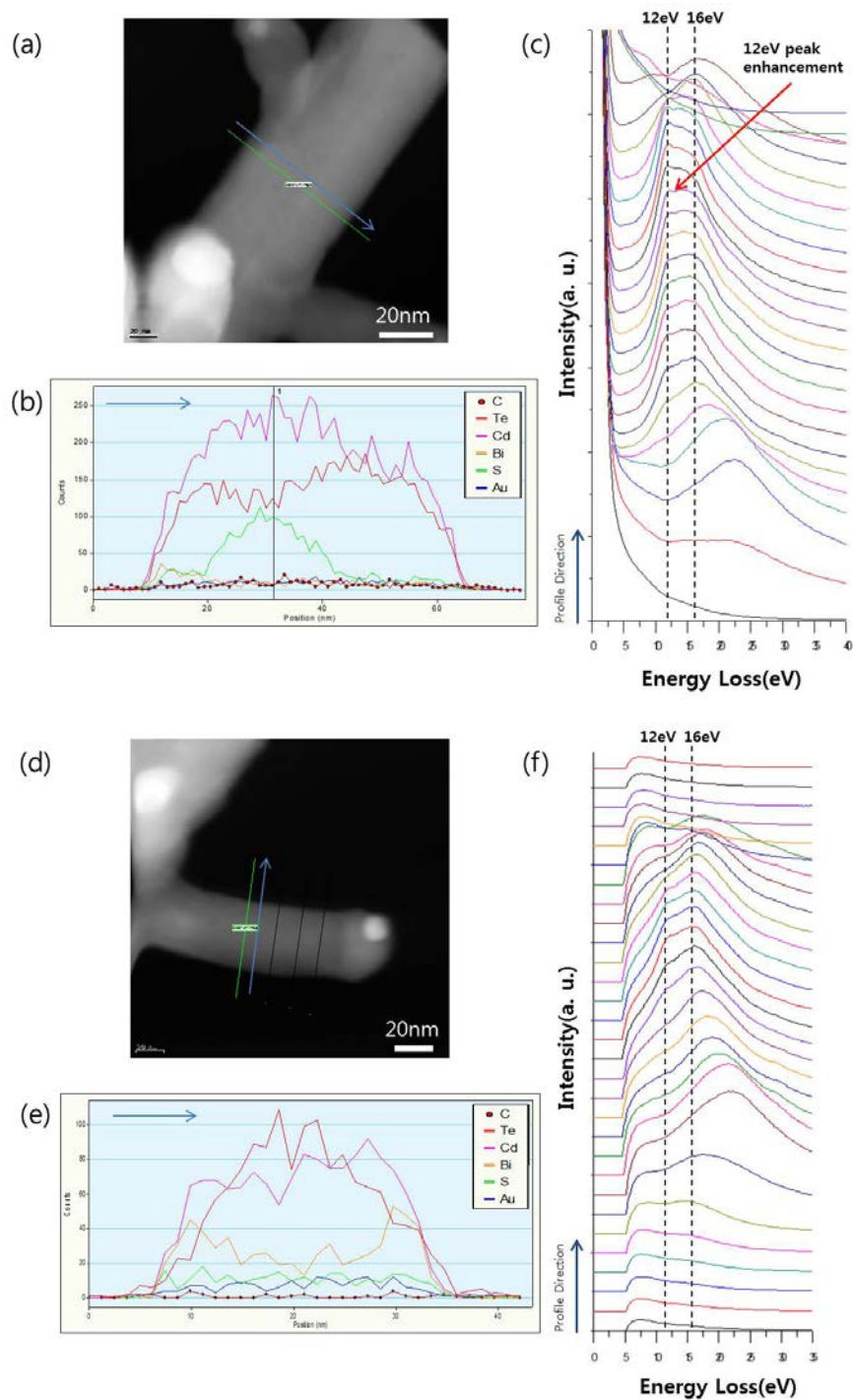


Fig. 4-11 Growth Direction [0002] (a) EELS Line Profile Region (b) EDS (c) EELS Data

4.4 CdS / CdTe 광학적 특성 측정

PL 측정결과 Reference로 삼은 CdS에서는 각각 2.049eV, 2.419eV에서의 Peak이 확인되었다.(Fig. 4-11) 이 Peak에 대한 반가폭(FWHM, Full Width at Half Maximum)은 0.243eV, 0.166eV이다. 2.419eV Peak에 대한 이해는 Energy bandgap에 해당하는 Peak으로 이해할 수 있으나, 2.049eV가 훨씬 큰 Intensity로 확인된 것에 대한 해석은 다른 문헌에서도 정확하게 이해되지 않는 부분이나 몇몇의 논문에서 Cd가 Interstitial로 작용하여 Donor state를 형성함에 따라 Yellow color를 띠는 것으로 설명하고 있다. 이는 샘플의 Quality의 문제가 있는 것으로 판단할 수 있다.

CdS / CdTe 샘플에서의 PL 데이터는 2.053eV, 2.356eV, 2.415eV의 세부분에서의 peak을 확인할 수 있다. 그래프에서의 불분명한 Peak의 Deconvolution은 Origin 프로그램 내에서의 Gaussian Method를 이용하여 분석하여보면 2.053eV와 2.415eV에 대한 부분은 실험적인 측정과 해석적 측면에서의 오차범위에 포함된다고 할 수 있으나 2.356eV에서의 Peak의 확인은 다른 Energy State의 생성으로 이해할 수 있다.

또한 측정시 CdTe에 대한 Peak은 CdS의 Peak의 세기가 상대적으로 크기에 Noise Level로서 묻혀서 보이지 않아 CdTe의 Peak 부분에 대해서 Range를 줄여서 측정하였으며, CdTe의 Energy Bandgap 크기인 1.441eV에서의 Peak을 확인하였다.

이로 인해 CdS와 CdTe의 Heterostructure의 형성에 대해서 확인할 수 있었으나 CdS의 Quality 측면이 개선 되어야 할 것으로 판단하였다.

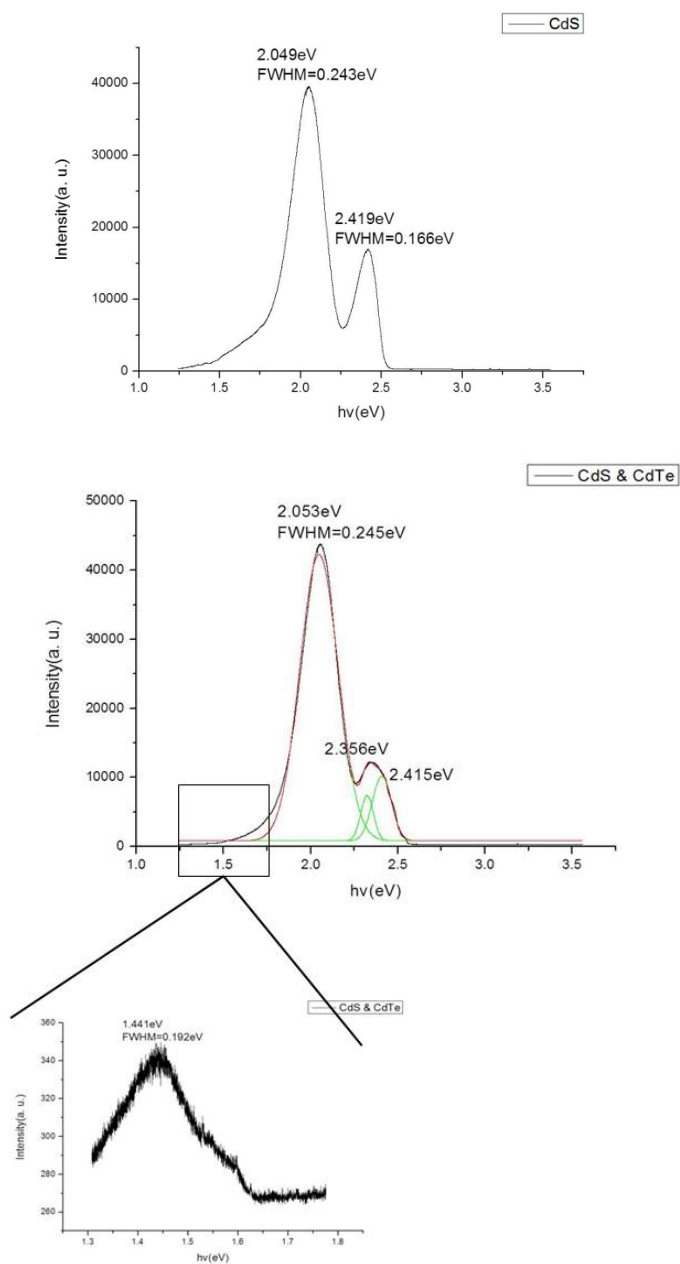


Fig. 4-12 (Top) CdS Reference PL Data (Down) CdS / CdTe PL Data

5.결 론

본 연구에서는 촉매를 사용한 VLS 메커니즘에 입각하여 CdS와 CdTe의 Hierarchical 구조를 성장시키고, 이러한 신구조에 대한 결정학적 특성, 성분 분석, 전자구조 분석, 광학적 특성을 측정하여 3차원 빌딩 구조를 형성하여 소자 접목을 위한 기초연구를 실시하였다.

SEM과 TEM을 통하여 가지와 기둥 구조가 형성되어 있음을 확인하였으며, XRD 측정을 통하여 CdS와 CdTe 모두 Hexagonal 구조를 가지고 있음을 확인하였다. 성분 분석을 위한 EDS 분석을 Line Profile로 가지부터 기둥까지 분석하였을 때 가지는 VLS 메커니즘을 통한 Au와 Bi 촉매에 의하여 CdTe가 형성된 것을 확인하였으며, 반면에 기둥에서 CdS 뿐 아니라 CdTe도 같이 검출되는 것을 확인하였다. 회절 패턴 분석을 통하여 샘플 내부에서 이 구조가 $[0002]$, $[11\bar{2}0]$ 방향으로 성장되어 있는 것을 확인하였으며, $[11\bar{2}0]$ 방향으로 성장한 구조가 더 많은 것을 확인하였다. 기둥에 대한 HR Image를 통한 Moire Fringe와 EDS를 통하여 기둥에서 Core-shell Like한 기하학적 형상이 생성되는 것으로 판단할 수 있었으며, 가지의 HR Image와 연동하여 $[0002]$ 방향으로 기둥이 성장한 구조에서는 Defect가 존재하는 가지가 $[\bar{1}2\bar{1}3]$ 방향으로, $[11\bar{2}0]$ 방향으로 성장한 기둥에서는 단결정으로 이루어진 $[0002]$ 방향으로 H-CdTe가 성장한 것을 확인할 수 있었으며, 성장방향에 대한 차이점은 EDS에서 $[11\bar{2}0]$ 방향으로 성장한 구조는 명확한 Core-shell 구조를 확인하였으나, $[0002]$ 방향으로 성장한 구조는 CdS와 CdTe가 치우치는 현상을 확인하였다.

EELS 측정에서 기둥과 가지에서 Interband Transition Peak과 Bulk Plasmon Peak을 확인하였으며, CdTe의 두께가 30nm 이상이 존재할 수 있는 기둥에서 Interband Transition Peak의

Intensity가 Bulk Plasmon Peak보다 큰 현상을 확인하여 직경 또는 두께가 30nm 이상인 CdTe의 경우 결정화가 더 잘 이루어졌다고 판단하였다.

PL을 이용한 광학적 특성 분석에서 Cd이 Interstitial로 작용하여 생성된 Donor state가 추가적으로 생성되어 Yellow Emission을 나타내는 것을 확인하였다.

이 실험의 결과를 토대로 이러한 신구조를 통하여 CdTe / CdS 3-D Building Block 형성 가능성을 확인하였으며, 특성 분석을 통하여 Nano Device의 접목에 대한 기초연구로서 의미가 있을 것이라 생각한다.

6.참고문헌

- [1] J. J. Loferski, *J. Appl. Phys.*, **27**, 777 (1956)
- [2] D. Wang, F. Qian, C. Yang, *et al.*, *Nano letters*, **4**, 871-874 (2004)
- [3] K. A. Dick, K. Deppert, M. W. Larsson, *et al.*, *Nature materials*, **3**, 380-384 (2004)
- [4] P. Gao and Z. L. Wang, *J. Phys. Chem. B*, **106**, 12653-12658 (2002)
- [5] H. Yan, R. He, J. Pham, *et al.*, *Adv. Mater.*, **15**, 402-405 (2003)
- [6] J. Zhou, Y. Ding, S. Z. Deng, *et al.*, *Adv. Mater.*, **17**, 2107-2110 (2005)
- [7] M. J. Bierman, Y. K. A. Lau, A. V. Kvit, *et al.*, *Science*, **320**, 1060-1063 (2008)
- [8] J. Zhu, H. Peng, A. F. Marshall, *et al.*, *Nat. Nanotechnol.*, **3**, 477-481 (2008)
- [9] A. Dong, R. Tang and W. E. Buhro, *J. Am. Chem. Soc.*, **129**, 12255-12262 (2007)
- [10] J.-Y. Liao, B.-X. Lei, H.-Y. Chen, *et al.*, *Energy Environ. Sci.*, **5**, 5750 (2012)
- [11] K. A. Dick, Z. Geretovszky, A. Mikkelsen, *et al.*, *Nanotechnology*, **17**, 1344-1350 (2006)
- [12] K. D. Kimberly A. Dick, Lisa S. Karlsson, Werner Seifert, L. Reine Wallenberg, Lars Samuelson, *Nano Lett.*, **6**, 2842-2847 (2006)
- [13] M. Kuno, O. Ahmad, V. Protasenko, *et al.*, *Chem. Mater.*, **18**, 5722-5732 (2006)
- [14] W. Zhou, A. Pan, Y. Li, *et al.*, *J. Phys. Chem. C*, **112**, 9253-9260 (2008)

- [15] Y. Jung, D.-K. Ko and R. Agarwal, *Nano Lett.*, **7**, 264–268 (2007)
- [16] X. Jiang, B. Tian, J. Xiang, *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci.* , **108**, 12212–12216 (2011)
- [17] J. Shi, Y. Hara, C. Sun, *et al.*, *Nano Lett.*, **11**, 3413–3419 (2011)
- [18] R. S. Wagner and W. C. Ellis, *Applied Physics Letters*, **4**, 89 (1964)
- [19] D. Bonnet, *International Journal of Solar Energy*, **12**, 1–14 (1992)
- [20] C. Li, Z. Liu and Y. Yang, *Nanotechnology*, **17**, 1851–1857 (2006)
- [21] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, *et al.*, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **20**, 12–20 (2012)
- [22] B. M. Kayes, H. A. Atwater and N. S. Lewis, *Journal of Applied Physics*, **97**, 114302 (2005)
- [23] M. Law, L. E. Greene, J. C. Johnson, *et al.*, *Nat. Mater.*, **4**, 455–459 (2005)
- [24] Z. Fan, H. Razavi, J.-w. Do, *et al.*, *Nat. Mater.*, **8**, 648–653 (2009)
- [25] B. L. Williams and K. Durose, *The 7th Photovoltaic Science Applications and Technology conference and exhibition* 6–8 (2011)
- [26] R. Hengehold and F. Pedrotti, *Phys. Rev. B*, **6**, 2262–2268 (1972)
- [27] S. M. Hosseini, *Phys. B Condens. Matter*, **403**, 1907–1915 (2008)

Abstract

Commercial CdTe solar cells, comprised of CdS and CdTe, have a theoretical efficiency of 30%. However, the actual efficiency is limited to 17%. Structural limitation of thin film solar cell is one of the main reason for the efficiency difference.

When hierarchical structure is made of two materials as a heterojunction, it makes a perpendicular relationship between the direction of light and the direction of the collected minority carrier. Hierarchical structure has attracted great attention because its structural interests and potential applications in 3-D building block for improving efficiency and functionality.

Characterization is essential for this structure because Hierarchical structure has various morphology (shape or crystal structure) and properties according to the growth system.

We have synthesized a hierarchical CdS / CdTe nanowire heterojunction by CSS(Close Space Sublimation) method, where the Au nanoparticle works as a catalysts in a VLS(Vapor Liquid Solid) process for CdS growth, and Au and Bi was used for CdTe growth by a tubular furnace at 10^{-3} torr.

SEM images of this structure show the branch growth from backbones with directional relationship. The X-ray diffraction pattern reveals the hexagonal structure of CdS and CdTe. HRTEM images show the two types of growth direction which are $[0002]$, $[11\bar{2}0]$. When the stem growth directions are $[0002]$, $[11\bar{2}0]$, the branches are $[11\bar{2}0]$, $[\bar{1}2\bar{1}3]$.

In the line profile EDS spectrum & Moire fringe, while [0002] stem has correct core-shell structure, $[11\bar{2}0]$ stem has off-center CdS Core in CdS / CdTe Heterostructure.

In the EELS spectrum of stem and branch, the stem has more interband transition intensity at 12eV than bulk plasmon peak at 16eV occasionally. But branch does not show this phenomenon, where only 16eV peak is dominant.

By result of low temperature PL, we found the dominant peak 2.05eV, 2.42eV, 1.44eV, 2.36eV. Dominant peak correspond to donor state induced by Cd interstitial, 2.05eV and 2.42eV are energy band gap for each material CdS, CdTe. An unknown peak at 2.36eV was observed.

In conclusion, we have confirmed the new structure growth and properties about hierarchical CdS / CdTe nanowire heterojunction by various measurements.

Key word : Hierarchical Structure, CdS / CdTe, TEM

Student I. D. : 2010-23178